



António Miguel
Portugal Raposo
Rodrigues de
Almeida

Monitorização e controlo remoto de sistemas de
rega agrícola

*Normal people... believe that if it ain't broke, don't fix it.
Engineers believe that if it ain't broke, it doesn't have
enough features yet.*
Scott Adams



**António Miguel
Portugal Raposo
Rodrigues de
Almeida**

**Monitorização e controlo remoto de sistemas de
rega agrícola**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de José Paulo Oliveira Santos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor Arnaldo Silva Rodrigues de Oliveira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos / Acknowledgements

Se há uma coisa que aprendi ao longo de todos estes anos de estudo, de ler e escrever trabalhos, relatórios e outros documentos mais ou menos técnicos, é que nestes parágrafos mais pessoais os autores tendem a reproduzir um modelo estereotipado e pouco personalizado. Evitando cair no mesmo erro vou tentar fazê-lo de um modo mais descontraído e informal, antes de passar ao documento que resume mais de um ano de trabalho. Desde logo, sinto que devo lançar a "culpa" por este trabalho a alguém. À boa maneira portuguesa, a "culpa" não foi minha. E só vou agradecer ao Patrick por me desafiar a ajudar o ambiente e a contribuir para a melhoria da economia local, quando for engenheiro, e ele me pagar um jantar. Obviamente que ele não teve a "culpa" sozinho, pois por trás desta dissertação está também o meu orientador, Professor Doutor José Paulo Santos, que prontamente aceitou o meu pedido e muito contribuiu para que este trabalho chegasse a bom porto. Queria também repartir a "culpa" com o grupo de colegas que todos os dias, por volta da mesma hora, me obrigavam a levantar e ir comer, e com os quais chegava mesmo a debater a dissertação de forma a abordar o problema por outros ângulos. Tudo isto, obviamente, só me trouxe "trabalhos e preocupações", mas também ânimo e aperfeiçoamento. Correndo o risco de, também eu, reproduzir o modelo tradicional de agradecimentos, quero deixar um sentido obrigado a todos os outros que de alguma forma participaram, ou me ajudaram, na concretização desta dissertação e consequentemente na concretização do meu curso. Em particular, quero agradecer aos meus pais que me apoiaram e motivaram desde que comecei a pensar a introdução até à escrita das últimas palavras da conclusão.

Palavras-chave

Recursos naturais; irrigação; monitorizar; controlar; temperatura; humidade; dispositivo remoto; Wi-Fi; NodeMCU.

Resumo

Hoje em dia, no sudoeste alentejano, onde a agricultura é uma atividade em expansão, sentem-se de uma forma cada vez mais frequente os efeitos das alterações climáticas. O aumento da temperatura média e a escassez de precipitação na primavera provocam uma redução das reservas de água disponíveis para rega no período estival. De acordo com as diretivas portuguesas, e com o intuito de tornar a agricultura uma atividade viável a longo prazo, é objetivo desta dissertação criar um sistema que aumente a eficiência dos processos de irrigação, com especial enfoque na agricultura do sudoeste alentejano.

A maioria dos sistemas de monitorização e controlo de rega hoje em dia comercializados não estão otimizados para alguns dos desafios da agricultura moderna. Em muitos casos os terrenos cultivados não pertencem ao agricultor que os explora (são arrendados), o que limita a instalação de equipamentos de rega. Por outro lado as soluções convencionais exigem muita mão de obra, ou necessitam de fontes energéticas externas, sejam elas combustíveis fósseis ou energia, elétrica da rede de distribuição, ou a troca periódica de pilhas. Estes fatores aumentam os custos com manutenção, criam entraves à utilização dos terrenos cultivados que podem mesmo deixar de ser viáveis. O presente trabalho documenta o desenvolvimento de um sistema de monitorização e controlo de rega, com capacidade para fornecer informação sobre os valores de temperatura e humidade do solo e do ar, ser portátil, de fácil instalação, auto-suficiente energeticamente e capaz de atuar válvulas de rega remotamente. Para alcançar este objetivo foram criados módulos que utilizam um NodeMCU como microcontrolador e comunicam através de Wi-Fi. Estes módulos recarregam as baterias com recurso a painéis solares, e são as unidades remotas do sistema. Para gerir o sistema foi criada uma aplicação que através da internet recebe os dados recolhidos nos terrenos e envia comandos para o início e fim dos ciclos de rega. Por fim foi desenvolvida uma interface para o utilizador que é servida através de um browser via página web para que seja possível interagir com o sistema em qualquer dispositivo, fixo ou móvel, que tenha acesso à internet.

Keywords

Natural resources; irrigation; monitor; control; temperature; humidity; remote devices; Wi-Fi; NodeMCU.

Abstract

Nowadays, in the southwest of Alentejo, where agriculture is an activity in expansion, the effects of climate change are often felt. The increase of the average temperature and the scarcity of rain in the spring cause a reduction of the water available for irrigation in the summer. According to the Portuguese directives, and in order to make agriculture a viable activity in the long term, this dissertation aims to create a system that increases the efficiency of irrigation systems, with a special focus on Southwest Alentejo agriculture.

Most of today's irrigation systems on the market are not optimized for some of the challenges of modern agriculture. In many cases the cultivated land does not belong to the farmer who exploits them (they are rented), which limits the installation of irrigation equipment. On the other hand, conventional solutions either require great amount of labor, or they need external energy sources. External energy may be derived from fossil fuels, or electricity which can be drawn from the distribution network, or by periodic exchanging of batteries. These factors increase maintenance costs, create barriers to the use of the land and potentially making it not viable for production.

The present paper documents the development of a system to monitor and control irrigation. This system must be capable of monitoring the temperature and humidity of the soil and air, it must be portable, easy to install in the field, energetically self-sufficient and be able to operate irrigation valves remotely. To achieve this goal, were developed modules that use a NodeMCU as a microcontroller and to communicate through a Wi-Fi network. These modules recharge the batteries using solar panels, and are the remote terminal units of the system. To manage the system an application was created that receives data from the land through the internet and sends commands to start and end irrigation cycles. Finally, a user interface was developed, which is presented through a web page on a browser so that the user can interact with the system on any fixed or mobile device that has access to the internet.

Índice

Lista de Tabelas	iii
Lista de Figuras	vii
Glossário	xi
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos	3
1.4 Estrutura da Dissertação	4
2 Revisão do Estado da Arte	5
2.1 Utilização da água em Portugal	5
2.1.1 PNUEA	5
2.2 Agricultura	6
2.2.1 Solo	6
2.2.2 Medição de humidade no solo	8
2.2.3 Métodos de determinação do teor de humidade no solo	10
2.2.4 Métodos de determinação do potencial do solo	10
2.2.5 Rega	11
2.3 Conceitos e tecnologias utilizados	12
2.3.1 Rede Industrial	12
2.3.2 SCADA	12
2.4 Estudos incidentes na monoturização e controlo de sistemas de rega	15
2.4.1 Otimização dos consumos de água na irrigação de campos de golfe	15
2.4.2 Automação da irrigação para melhoria da eficiência energética em lavouras de arroz	16
2.4.3 Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module	18
2.5 Soluções comerciais	20
3 Solução Proposta	23
3.1 Conceito	23
3.2 Hardware	26
3.2.1 Sistema de retransmissão de dados	26
3.2.2 Módulos sensores e atuadores	26

3.3	Software	28
3.3.1	Unidade <i>mestre</i> do sistema de monitorização e controlo de rega . . .	28
3.3.2	Módulos	29
3.4	Interações no sistema	29
4	Implementação	31
4.1	Unidade mestre do sistema de monitorização e controlo de rega	31
4.1.1	Software escolhido	32
4.1.2	Funcionamento da unidade mestre	32
4.1.3	Interface homem máquina	39
4.1.4	Interface com os módulos	47
4.2	Sistema de retransmissão de dados	49
4.3	Módulos	50
4.3.1	Hardware	51
4.3.2	Software	65
4.3.3	Interface dos módulos	68
4.3.4	Montagem final	72
4.3.5	Funcionamento	75
5	Resultados Experimentais	79
5.1	Resultados esperados	79
5.2	Resultados obtidos	80
5.2.1	Resultados dos testes unidade mestre	80
5.2.2	Resultados dos testes aos módulos	82
5.2.3	Resultados dos testes ao conjunto	82
5.3	Análise dos resultados	87
6	Discussão de Resultados	89
6.1	Conclusão	89
6.1.1	Trabalhos futuros	90
	Bibliografia	94
	Apêndice	95
	Apêndice	97
	A Servidor	99
	B Módulos	103
	C Resultados	109

Lista de Tabelas

2.1	Algumas características do solo segundo [7]. Adaptado.	8
2.2	Características de tipos de partículas e tipo de solos. Adaptado [8]	8
4.1	Exemplo do conteúdo da base de dados Fields	35
4.2	Excerto de uma calendarização de rega.	35
A.1	Lista de caminhos pré-programados no servidor.	100
A.2	Esquema das bases de dados de cada terreno.	100
A.3	Carateres utilizados para gerar webId.	101
B.1	Lista de componentes do circuito de proteção.	103
B.2	Lista de componentes da placa do módulo atuador.	104
B.3	Lista de componentes da placa do módulo sensor.	104

Lista de Figuras

2.1	Uso da água em Portugal no ano 2009 [5]. Adaptado.	6
2.2	Diagrama de classes da textura do solo [7].	7
2.3	Exemplo de uma rede industrial [10].	13
2.4	Arquitetura simplificada de um sistema SCADA.	13
2.5	Arquitetura proposta por [24].	16
2.6	Esquema físico do sistema de controlo [25].	17
2.7	Algoritmo à esquerda e funcionamento do sistema à direita. Adaptado de [25].	18
2.8	Algoritmo de funcionamento da unidade remota [26].	19
2.9	Algoritmo de funcionamento da unidade mestre [26].	20
3.1	Sugestão de solução.	25
3.2	Arquitetura simplificada dos módulos.	27
3.3	Sugestão de funcionamento da unidade <i>mestre</i> do sistema de monitorização e controlo de rega.	28
3.4	Diagrama de comunicação entre clientes e servidor.	30
3.5	Relação entre clientes e servidor.	30
4.1	Esboço da solução que se pretende obter.	31
4.2	Diagrama de funcionamento do <i>software</i>	33
4.3	Diretório da base de dados.	34
4.4	Método de atualização da calendarização do loop interno.	36
4.5	Página de login.	40
4.6	Barra de título.	41
4.7	Barra de logout.	41
4.8	Janela do mapa.	42
4.9	Janela de calendarização da rega.	42
4.10	Secção de escolha de terreno.	43
4.11	Secção de opções do terreno, primeiro menu.	43
4.12	Secção de opções do terreno, segundo menu.	44
4.13	Secção de criação de terreno.	45
4.14	Zona de gráficos.	46
4.15	Esquema de comunicação entre a unidade mestre do sistema de monitorização e controlo de rega e um módulo genérico.	48
4.16	Primeiro esboço do sistema de retransmissão de dados.	49
4.17	<i>Vodafone Smart 6</i> utilizado.	50
4.18	Esquema de carga do <i>smartphone</i>	50

4.19	Blindagem dos módulos.	52
4.20	Painel solar utilizado.	53
4.21	Bateria utilizada.	53
4.22	<i>Power bank</i> testado.	54
4.23	Controlador de carga utilizado.	54
4.24	Esquema do IO do <i>NodeMCU</i> [42].	55
4.25	<i>NodeMCU</i> (não à escala real) [42].	56
4.26	Picos de corrente representados num osciloscópio [44]. Adaptado.	56
4.27	Primeiro esboço do circuito de proteção.	57
4.28	Segunda versão do circuito de proteção.	57
4.29	Placa eletrónica do atuador.	59
4.30	Caudalímetro utilizado nos testes.	60
4.31	Solenóide da válvula.	61
4.32	Válvula de rega utilizada.	61
4.33	Placa eletrónica do sensor.	62
4.34	Sensor de humidade do solo.	62
4.35	Resultados dos testes do teor de humidade do solo.	64
4.36	Saturação em função do ADC.	65
4.37	Diagrama de fluxo do código.	66
4.38	Diagrama do diretório do chip <i>esp8266</i>	68
4.39	Interface física do módulo sensor.	69
4.40	Interface física do módulo atuador.	69
4.41	Página inicial do módulo.	70
4.42	Página de configuração do módulo.	71
4.43	Página de erros do módulo.	71
4.44	Página de ligar o LED.	71
4.45	Página de pedido não executado.	72
4.46	Interior do módulo atuador.	73
4.47	Montagem da válvula.	74
4.48	Interior do módulo sensor.	74
4.49	Montagem do sensor de temperatura e humidade do ar.	75
4.50	Esquema da colocação do módulo atuador na terra.	75
4.51	Esquema da colocação do módulo sensor na terra.	76
4.52	Esquema da implementação no terreno de cultivo.	77
5.1	Resultados dos testes ao loop interno.	81
5.2	Resultados dos testes ao loop do servidor.	81
5.3	Resultados dos testes ao tempo de resposta ao loop do servidor.	82
5.4	Temperatura e humidade do ar (primeiro teste).	83
5.5	Temperatura do ar medida e temperatura do ar à sombra (primeiro teste).	84
5.6	Temperatura do ar medida e temperatura do ar, à sombra (segundo teste).	84
5.7	Temperatura do solo (primeiro teste).	85
5.8	Temperatura do solo (segundo teste).	85
5.9	Nível de saturação do solo (primeiro teste).	85
5.10	Diagrama da disposição dos sensores de humidade no solo testado (primeiro teste).	86
5.11	Potencial elétrico das baterias (primeiro teste).	86

5.12	Aviso de início de sessão (primeiro teste).	87
5.13	Aviso de bateria e humidade baixas (primeiro teste).	87
A.1	Página principal de interface homem máquina.	102
B.1	Esquema elétrico do atuador.	105
B.2	Esquema elétrico do sensor.	106
B.3	Módulos sensor e atuador fechados (à esquerda e à direita respetivamente).	107
B.4	Módulos sensor e atuador fechados (para se estabelecer uma escala a régua azul no chão mede 30 centímetros).	108
C.1	Primeira montagem experimental.	110
C.2	Segunda montagem experimental.	111

Glossário

AC *Alternating current* - Corrente Alternada (em português).

ADC *Analog to Digital Converter* - Conversão analógica para digital (em português).

API *Application Programming Interface* - Interface de Programação de Aplicações (em português).

CRC *Cyclic Redundancy Check* - Verificação Cíclica de Redundância (em português).

DC *Direct current* - Corrente Direta (em português).

Ecma *Ecma International é uma associação industrial fundada em 1961. Dedicase à padronização da informação e sistemas de comunicação.*

GPIO *General Purpose Input/Output* - Portas de entrada e saída de uso geral do microcontrolador.

GPRS *General Packet Radio Service* - Serviço de Rádio de Pacote Geral (em português).

GSM *Global System for Mobile Communications* - Sistema Global para Comunicações Móveis (em português).

HMI *Human-Machine Interface* - Interface Homem Máquina (em português).

HTML *HyperText Markup Language* - É uma linguagem utilizada na construção de páginas Web.

HTTP *HyperText Transfer Protocol*.

HTTPS *Hyper Text Transfer Protocol Secure*.

IDE *Integrated Development Environment* - Ambiente Integrado de Desenvolvimento (em português).

LED *Light Emitting Diode* - Díodo Emissor de Luz (em português).

MB *Megabyte*.

μC *Microcontrolador*.

MTU *Master Terminal Units* - Unidade Mestre (em português). É também referido como *Master*.

OSI *Open System Interconnection*.

PLC *Programmable logic controller*.

PNA *Plano Nacional da Água*.

PNUEA *Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água.*

PWM *Pulse Width Modulation.*

RF *Radio frequency* - Radiofrequência (em português).

RTC *Real-Time Clock.*

RTU *Remote Terminal Units* - Unidade Remota (em português). Muitas vezes referido como *Slave*, uma vez que são unidades mandadas pelo *Master*.

SCADA *Supervisory control and data acquisition* - Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (em português).

S.I. *Sistema Internacional de Unidades.*

SMTP *Simple Mail Transfer Protocol* - Protocolo de transferência de correio simples (em português).

SSID *Service set identification.*

TTL *Time To Live.*

URL *Uniform Resource Locator.*

Unidades Utilizadas.

A *Ampere* - Unidade de intensidade de corrente elétrica (S.I.).

F *Farad* - Unidade de capacidade elétrica (S.I.).

l *Litros* - Unidade de volume.

Ah *Ampere hora* - Unidade de carga elétrica.

mm *Milímetros* - Unidade de comprimento.

Ω *Ohm* - Unidade de resistência elétrica (S.I.).

kg *Quilograma* - Unidade de massa (S.I.).

V *Volt* - Unidade de tensão elétrica (S.I.).

W *Watt* - Unidade de potência (S.I.).

W/m^2 *Watt por metro quadrado*.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Neste capítulo introdutório são apresentados os temas que servem de fundamentação para este estudo, são expostos os motivos que levaram à sua elaboração, bem como os objetivos que se pretendem cumprir.

É hoje em dia ponto assente que dos $1.386 * 10^{21}$ litros (l) de água que cobrem a superfície terrestre, só aproximadamente $9.31 * 10^{16}$ l são água doce não congelada [1]. Pode-se então afirmar que a água doce é um recurso relativamente pouco abundante e cuja disponibilidade depende, em boa parte, das condições climáticas.

O clima de quase todo o país (bem como de boa parte da Península Ibérica e da bacia Mediterrânea) é marcado por uma grande variabilidade intra-anual e inter-anual das precipitações, donde resulta uma também muito sensível variação das disponibilidades hídricas, tanto no que se refere à água acumulada nas albufeiras das barragens, como no que diz respeito à existente em reservas do subsolo. A estas características climáticas, de grande variabilidade e imprevisibilidade das disponibilidades hídricas, acresce para grande parte do centro e sul do país, a existência de longos verões com temperaturas particularmente elevadas e com total ou quase total ausência de precipitação que pode durar vários meses.

Como consequência das alterações climáticas que estamos a viver torna-se previsível que na generalidade do território continental português a temperatura média venha a aumentar progressivamente, ao mesmo tempo que se prevê a redução da precipitação [2]. As secas serão provavelmente cada vez mais severas e frequentes e as temperaturas mais altas. Assim, é de admitir que ao mesmo tempo que a disponibilidade de água se reduza, venha a aumentar a temperatura e a evapotranspiração, o que consequentemente obriga a utilizar maiores volumes de água, ou usá-la de forma mais eficiente.

A "Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas" [3], de 2010, oferece dados objetivos sobre as alterações registadas nos últimos decénios. Neste documento é referido que existe uma tendência significativa do aumento do número de "dias de Verão", de "noites tropicais" e no índice anual de ondas de calor, bem como grande irregularidade nos períodos de precipitação em especial na primavera e inverno. É conclusão deste mesmo documento que "As alterações climáticas não são, portanto, algo que irá ocorrer num futuro longínquo, mas antes um processo dinâmico que está em curso e que urge conhecer, acompanhar e compreender.". De resto os agricultores do sudoeste de Portugal assumem as alterações climáticas como dado empiricamente adquirido que já

obriga a mudar épocas de sementeira e técnicas de cultivo, em particular pela redução de precipitação primaveril e a redução das reservas disponíveis para rega no período estival. No que se refere às expectativas sobre o que o futuro nos reserva nesta matéria, parece que a tendência será para o agravamento da situação, sendo portanto altamente desejável que se consiga atuar de modo preventivo. O documento anteriormente citado, no que respeita em particular à agricultura e florestas é claro ao afirmar que "Os cenários de alterações climáticas conduzem à necessidade de se melhorar e seleccionar as variedades melhor adaptadas a climas quentes e secos e à substituição de algumas culturas por outras menos exigentes em água. As práticas culturais terão de responder às novas condições, tanto ao nível da oportunidade da sua realização (por exemplo, data das operações culturais) como ao nível da tecnologia utilizada (por exemplo, menor mobilização do solo e sistemas de rega mais eficientes). O regadio terá uma importância crescente pelo efeito limitante do recurso água. Nesta perspectiva, haverá a necessidade de promover a regularização da variabilidade, tanto interanual como ao longo do ano, de forma a assegurar a disponibilidade de água às culturas nas alturas mais críticas do ano."

A consciência da necessidade de melhorar as condições gerais de utilização dos recursos hídricos e em particular do uso da água para fins agrícolas, levou os autores do estudo a concluir que é cada vez de maior importância a gestão racional do uso da água, melhorando a eficiência do transporte, distribuição, armazenamento e aplicação. A melhoria deve então passar pela modernização dos regadios existentes e pela inovação tecnológica. Mais recentemente, no ano de 2015, a Resolução do Conselho de Ministros n.º 56/2015 [4], renova as preocupações com as consequências previsíveis das alterações climáticas. Diz-se nomeadamente que "Os cenários de evolução climática para Portugal até ao final do século XXI apontam para condições progressivamente mais desfavoráveis para a atividade agrícola, decorrentes da redução da precipitação e aumento da temperatura, do agravamento da frequência e intensidade dos eventos extremos e do aumento da suscetibilidade à desertificação.", acrescentando-se que "O desenvolvimento recente do conhecimento científico sobre clima tem permitido reduzir a incerteza associada à sua evolução futura, designadamente para Portugal, evidenciando a necessidade incontornável de atuação para adaptar a sociedade às novas condições."

Nos últimos anos, com o aumento do custo dos recursos naturais, e com a crescente preocupação em preservar os mesmos, surgiu o conceito de ecoeficiência. Esta maneira de pensar a realidade e os recursos que nos rodeiam tenta reduzir o seu uso e maximizar o resultado, isto é, diminuir a ineficiência dos sistemas. Uma das áreas da produção de bens que mais pode beneficiar com as melhorias ao nível da ecoeficiência é o setor primário, e particularmente o subsector agrícola. Neste caso particular, podem ser conseguidos ganhos de eficiência na utilização de água para irrigação, já que este é um dos recursos naturais mais abundantemente usado nesta atividade. Em Portugal o setor da agricultura é responsável por 81% do total de consumo de água, e é também o setor que mais água desperdiça, com uma ineficiência de 37.5% [5].

A agricultura, embora tenha evoluído muito nos últimos anos e esteja cada vez mais mecanizada, continua a exigir muito trabalho manual. No que respeita às operações de irrigação continua a verificar-se muita ineficiência quer no fator trabalho (abrir e fechar linhas de rega, controlar caudais, etc.), quer na utilização do próprio recurso "água" (utilizar água com base em previsões pouco rigorosas, sem grande controlo das condições efetivas do terreno, como o teor de humidade do solo). É de realçar que a atividade agrícola tem especificidades que devem ser sempre levadas em consideração e que difi-

cultam o controlo do processo de irrigação: as parcelas de um mesmo agricultor podem estar afastadas alguns quilómetros entre si, as regas podem só terminar a meio da noite e avarias ou ruturas nas linhas de água podem acontecer horas antes de alguém as detetar. Há evidentemente nesta matéria, para além de um problema ambiental, um problema logístico com custos financeiros e com impacto na imagem das empresas, bem como nos seus resultados económicos. Por estas razões torna-se necessário aplicar soluções de monitorização e controlo do uso da água na atividade agrícola, a bem de uma gestão racional dos recursos naturais, ganhos de eficiência e de competitividade das empresas do setor.

1.2 Motivação

Embora já existam no mercado soluções que lidem com este problema, não há nenhuma solução pensada para Portugal, mais especificamente para o litoral alentejano, onde será testada esta solução. Esta zona possui condições altamente favoráveis à prática da agricultura moderna, com solos arenosos e um clima que permite a produção de certas culturas antes do resto da Europa. Outrora considerados pobres, estes tipo de solos são hoje uma *tela em branco* que pode ser preparada para qualquer cultura. No entanto, este solo só poderá ser cultivado enquanto houver água na região. Sendo esta uma zona onde a agricultura é uma atividade importante, e em forte expansão, surgiu o interesse de tentar melhorar de alguma forma este setor.

O uso ineficiente de água é um tema atual e que necessita de ser revisto e tratado. O controlo de irrigação tradicional já não é suficiente para travar os gastos desnecessários de água. Há assim uma motivação para servir a comunidade local, tentando criar um ambiente sustentável com consumo de água inteligente e moderado. Por outro lado, a agricultura desta região sofre com a forte concorrência praticada noutras áreas agrícolas da União Europeia (e mesmo de fora dela), pelo que qualquer melhoria no sistema produtivo pode constituir uma importante vantagem para o sucesso das empresas desta região.

1.3 Objetivos

O objetivo deste estudo é criar um protótipo funcional de um produto implementável no terreno, que permita atuar válvulas de rega remotamente, medir a temperatura e humidade do ar e do solo em vários pontos do terreno cultivado. Desta forma permitindo ao agricultor determinar o tempo de rega necessário e iniciar um ciclo de rega remotamente, ou seja, monitorizar e controlar sistemas de rega de acordo com as necessidades a cada momento sem estar presente no terreno.

Tal produto será composto de duas partes principais: a parte física (hardware); a parte de monitorização e interface com o utilizador (software).

O hardware deverá ser facilmente transportável, de fácil utilização e deverá possibilitar a atuação remota da rega, sem que sejam construídas infraestruturas no terreno.

O software deverá permitir operar manualmente ou autonomamente o sistema, possuir uma interface multi-plataforma e lançar alertas em tempo real para o caso de falha no sistema.

Como um objetivo adicional tentar-se-à que a solução seja economicamente viável, isto é, com um custo igual ou inferior às soluções atuais e com recurso a equipamentos e

tecnologias fáceis de obter.

1.4 Estrutura da Dissertação

No presente capítulo é introduzida a problemática do uso excessivo de água na agricultura e as dificuldades em utilizar alguns dos sistemas de rega atuais, com especial interesse no sudoeste alentejano. Uma vez contextualizada a problemática são expostas as razões que levam à elaboração deste estudo, às quais se segue os objetivos a alcançar. No capítulo segundo é avaliado o estado da arte e são apresentadas algumas das normas e diretivas portuguesas quanto ao uso de água agrícola, tecnologias relevantes para a dissertação, outros estudos efetuados sobre este tema e por fim são exploradas quais as opções já disponíveis no mercado.

No capítulo seguinte, o terceiro, é aprofundado o conceito, são consideradas as opções e tecnologias. Encaminha-se assim este projeto para um prototipo conceptual.

No capítulo quarto é concretizado o conceito. São feitas as escolhas que mais se adequam ao cumprimento dos objetivos.

No capítulo quinto é avaliada a solução, são apresentadas as metodologias de teste e verifica-se se os resultados cumprem ou não com os objetivos.

Por último no capítulo sexto são retiradas conclusões sobre o trabalho desenvolvido e são sugeridas melhorias ao mesmo. É assim aberto o caminho para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão do Estado da Arte

2.1 Utilização da água em Portugal

Em Portugal a água é, cada vez mais, um recurso natural que necessita de ser preservado. Embora a sua escassez não seja ainda um problema grave, e recorrente, poderá um dia vir a ser.

Nos próximos parágrafos são apresentadas algumas medidas e metas do Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água que tem como objetivo tornar mais eficiente o uso de água em Portugal e em particular no setor agrícola.

2.1.1 PNUEA

O Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNUEA), integrado no Plano Nacional da Água (PNA), prevê linhas orientadoras para o uso eficiente de água em Portugal e tem como objetivos gerais melhorar a eficiência da utilização da água e criar uma cultura de valorização da água em Portugal [5]. A implementação de 2012 constrói sobre os dados conhecidos (dados dos anos 2000 até 2010) as metas a atingir até ao ano de 2020. O documento incide sobre os três setores consumidores de água, setor Urbano, setor Agrícola e setor Industrial. Segundo o documento PNUEA, em 2009, a procura de água total foi de $4.199 * 10^6 m^3$. A maior fatia, 81% do total, foi utilizada na agricultura, que é também o setor com maior ineficiência, desperdiçando 37.5% da água que consome da rede de abastecimento (ver figura 2.1).

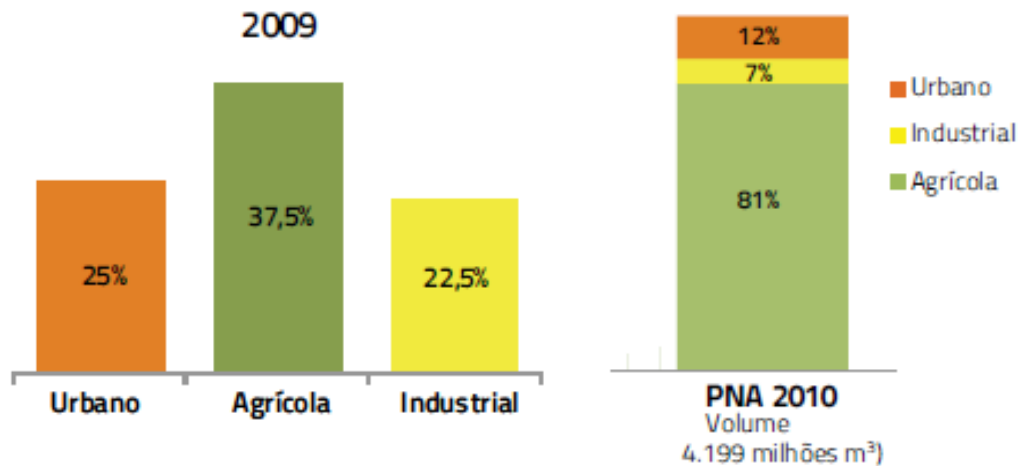
No que toca à agricultura, o PNUEA tem como grande objetivo atingir uma eficiência de 65% dos sistemas de rega através da:

- melhoria da qualidade dos projetos de captação, exploração e rega;
- redução das perdas de água no armazenamento, transporte e distribuição;
- redução das perdas na aplicação de água ao solo. Automatização da rega e introdução de alarmes agro-meteorológicos.

Para atingir a meta foram estabelecidas medidas, das quais se salientam:

- reconversão dos métodos e tecnologias de rega;
- adequação dos volumes de rega às necessidades das culturas;

- redução das perdas nas redes e canais de rega;
- modernização das redes hidráulicas com dispositivos que permitam gerir melhor a água.



(a) Ineficiência do uso de água.

(b) Procura relativa de água.

Figura 2.1: Uso da água em Portugal no ano 2009 [5]. Adaptado.

2.2 Agricultura

A agricultura, *Arte de cultivar a terra, de a fertilizar. Em sentido geral: o conjunto de operações e dos cuidados por intermédio dos quais o homem obtém da terra as produções que servem para satisfazer as suas necessidades.* [6]. Muito se pode dizer sobre esta atividade fundamental à subsistência Humana, a Grande Enciclopédia Portuguesa e Brasileira dedica-lhe mais de dez páginas.

Nesta dissertação são estudadas duas componentes da agricultura: o solo, quais as suas propriedades físicas e como interage com a água; e que tipos de rega são utilizados, como é transportada a água e aplicada ao solo.

2.2.1 Solo

O solo, fisicamente, é uma mistura heterogênea de partículas com três fases distintas, compostas por sólidos, líquidos e gases. A fase sólida, é composta de pequenas partículas minerais e orgânicas, e preenche cerca de 50% do volume ocupado pelo solo. As restantes duas fases, líquida e gasosa, ocupam os espaços vazios entre as partículas e são compostas maioritariamente de água e ar [7].

O solo é caracterizado, entre outras, pela sua textura, estrutura, consistência e densidade, cor e temperatura. Estas características são por sua vez obtidas medindo as propriedades das partículas suas constituintes.

Textura

As partículas do solo resultam da erosão física e da alteração química das rochas e minerais, o que dá origem a partículas de vários tamanhos e formas. O tamanho das partículas é responsável por quão fino ou grosseiro é o solo, ou seja, qual a sua textura. Conforme as proporções das partículas de diferentes dimensões assim se caracteriza o tipo de solo como sendo cascalho, areia grosseira, areia fina, silte ou argila. No entanto o solo pode conter não um só tipo, mas uma mistura dos três principais (areia, silte e argila). Para diferentes composições de solo são atribuídas classes segundo o diagrama ternário da figura 2.2.

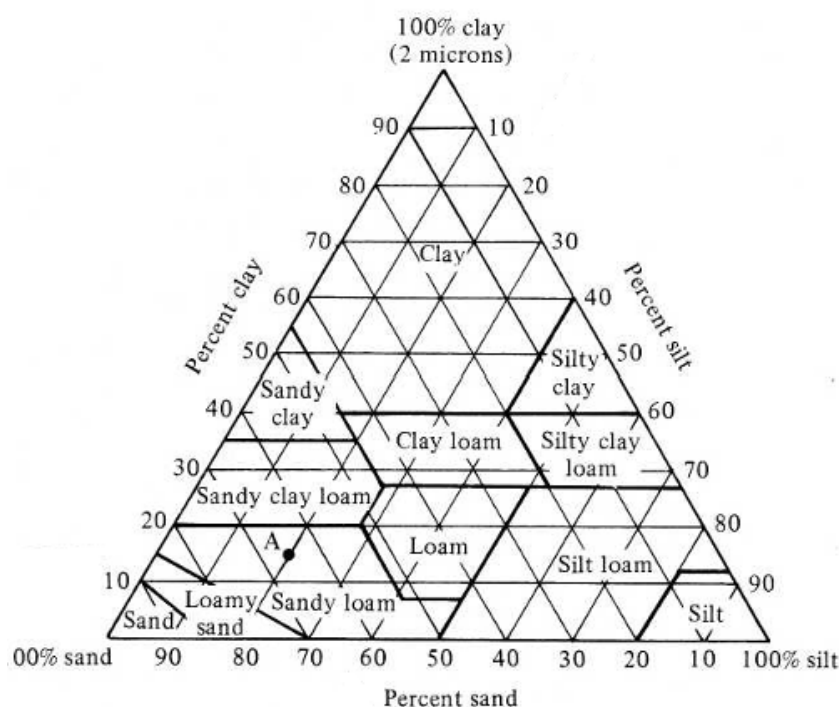


Figura 2.2: Diagrama de classes da textura do solo [7].

Tal como demonstrado na tabela 2.1 a dimensão das partículas está associada à quantidade de partículas e à área de superfície exposta para uma dada massa. As referidas características são responsáveis pelo comportamento da água nos diferentes tipos de solo, uma vez que a água é retida por adsorção: quanto maior a área exposta de material mais água é adsorvida. A argila é bastante eficiente a reter água, não só tem partículas finas, mas estas têm também forma de "prato", que apresenta um rácio de área de superfície para volume mais elevado do que o de uma partícula típica, de forma aproximadamente esférica. Por outro lado partículas de maiores dimensões drenam mais rapidamente [7].

Densidade

A densidade do solo é medida de duas formas, a densidade média de cada partícula e a densidade aparente (ou volumétrica). Como é de esperar a densidade aparente não

Tabela 2.1: Algumas características do solo segundo [7]. Adaptado.

Tipo de Solo	Diâmetro [mm]	Quantidade de partículas por grama [g^{-1}]	Área de superfície [$\frac{cm^2}{g}$]
Cascalho	>2	-	-
Areia Grosseira	2 - 0.2	720	23
Areia Fina	0.2 - 0.02	46000	91
Silte	0.02 - 0.002	5776000	454
Argila	<0.002	90260853000	8000000

Tabela 2.2: Características de tipos de partículas e tipo de solos. Adaptado [8]

Tipo de partícula	Densidade [g/cm^3]	Tipos de solo	Densidade aparente	Porosidade
Areia grosseira	2.655	Arenoso	1.6	40
Areia fina	2.59	Areia e Silte	1.4	47
Silte	2.798	Silte	1.3	50
Argila	2.837	Argiloso	1.1	58

depende só da densidade das partículas que a constituem, mas sim de quão compactadas estão. O solo pouco compactado diz-se poroso. A porosidade de um solo é inversamente proporcional à sua densidade aparente. Se um solo possui partículas com uma densidade média de 2.65 g/cm^3 e uma densidade aparente de 1.3 g/cm^3 (valor típico para solos minerais) tem 50% de porosidade, ou seja, 50% do seu volume é espaço vazio. Um solo pouco compactado, é ideal para o enraizamento de plantas, por outro lado, um solo compactado dificulta a irrigação ao dificultar a penetração da água. A areia tem uma baixa área superficial e uma porosidade elevada, isto faz com que a areia tenha boa capacidade para transmitir água e uma má capacidade de a reter [7]. Em geral na agricultura o solo deve conter macro-poros (como os da areia) e micro-poros (como a argila) de tal forma equilibrados que a água é igualmente distribuída por todo o terreno, sem que este alague ou seque por completo.

São valores típicos de densidade dos diferentes tipos de partículas, densidade aparente e porosidade de diferentes tipos de solo, os apresentados na tabela 2.2.

Temperatura

A atividade dos microrganismos e os processos químicos que se dão no solo dependem da temperatura. A baixas temperaturas os microrganismos reduzem a sua atividade e se a temperatura for inferior a 0^0 centígrados a água pode congelar, deixando assim de se movimentar. Com temperaturas elevadas ou forte radiação solar, a camada de ar junto ao solo fica mais seca, aumentando a evaporação da água.

2.2.2 Medição de humidade no solo

Vários fatores levaram o Homem a estudar a humidade presente no solo. Um dos fatores mais importantes é a agricultura. A boa produtividade das culturas depende da quantidade de água junto das suas raízes. O teor de humidade pode também ajudar a

prever a ocorrência de enchentes relâmpago.

As medições de humidade no solo podem tanto determinar o teor de água no solo ($massa_{agua}/massa_{solo}$ ou $volume_{agua}/volume_{solo}$), como podem determinar o potencial energético da água no solo, e a relação entre estas grandezas depende de características como a densidade ou a textura do solo [9].

Teor de humidade no solo

Como é dito em [9], as medições do teor de humidade podem ser efetuadas com base mássica ou volumétrica. O seu valor é medido em percentagem e representa-se comumente pelo símbolo θ . A análise com base mássica é denominada de gravimétrica, e é determinada por

$$\theta_g = \frac{M_{agua}}{M_{solo}} \quad (2.1)$$

onde M é a massa de substância e θ_g é o teor de humidade gravimétrico (normalmente representado em percentagem).

A análise volumétrica e a sua relação com a análise gravimétrica são feitas de acordo com as equações (2.2) e (2.3), respetivamente.

$$\theta_V = \frac{V_{agua}}{V_{solo}} \quad (2.2)$$

$$\theta_g = \theta_V * \left(\frac{\rho_{agua}}{\rho_{solo}} \right) \quad (2.3)$$

onde V é o volume de substância, θ_V é o teor de humidade volumétrico e ρ é a massa específica da substância.

Como é resultado de uma medição direta, o valor de θ_g é usado como o valor de referência para todas as outras medições. No entanto a técnica utilizada para medir este valor é destrutiva, isto é, não é possível medir a mesma amostra duas vezes, isto leva a que outros métodos menos diretos sejam utilizados.

Grau de saturação

O grau de saturação do solo expressa a relação entre o espaço disponível (vazio) no solo e o volume de água que nele se encontra. O valor do grau de saturação do solo permite saber quanta água contém o solo e quanta este ainda consegue reter. A saturação do solo é dada por

$$S = \frac{V_a}{V_v} \quad (2.4)$$

onde S é o grau de saturação, V_a é o volume de água e V_v é o volume vazio.

Potencial energético da água no solo

O potencial energético do solo é, segundo [9], importante, pois permite analisar onde há maior tendência de se deslocar a água e o quão difícil é extrair a água do solo. Formalmente o potencial da água no solo mede a capacidade da água de executar trabalho, no caso do potencial ser negativo este mede o trabalho necessário para extrair água do solo. O potencial total da água é representado por ψ_t e é obtido como resultado da equação

(2.5), onde ψ_z é o potencial gravítico, ψ_m é o potencial matricial (associado à energia de adsorção da matriz do solo), ψ_o é o potencial osmótico e ψ_p é o potencial da pressão.

$$\psi_t = \psi_z + \psi_m + \psi_o + \psi_p \quad (2.5)$$

É possível prever o deslocamento da água no solo, pois esta tende a deslocar-se dos pontos de maior energia para os pontos de menor energia, no entanto, nem todas as componentes da equação (2.5) estão sempre presentes, por exemplo ψ_p só existe quando o solo se encontra saturado e ψ_o só atua se houver uma membrana semi-permeável com um desequilíbrio energético.

2.2.3 Métodos de determinação do teor de humidade no solo

Método direto

O método direto de determinação do teor de humidade é bastante simples. Como já referido este é um método destrutivo. O primeiro passo é a recolha de uma amostra de solo. Esta deve ser perturbada o mínimo possível e deve ser hermeticamente armazenada. A massa da amostra é posteriormente medida e em seguida esta é aquecida até toda a humidade evaporar. A amostra pode considerar-se seca quando a sua massa deixar de variar entre aquecimentos sucessivos. A variação na massa corresponde à massa de água evaporada e pela equação (2.1) é possível determinar qual o teor de humidade no solo.

Método indireto

Existem vários métodos indiretos para medição do teor de água no solo. Os métodos com recurso a sensores radiológicos e dielétricos são abordados nos próximos parágrafos. São utilizados dois métodos radiológicos diferentes para medir o teor de humidade do solo: um dos métodos utiliza neutrões de alta energia para detetar núcleos de átomos de hidrogénio no solo; o outro método mede a atenuação de radiação gama ao passar pelo solo. Ambos os equipamentos utilizados para estas medições são portáteis, mas necessitam de calibração e os utilizadores necessitam de utilizar proteção contra a radiação. Os métodos dielétricos (ou capacitivos) tiram partido da variação do campo elétrico gerado, através do solo, e da alteração da sua permissividade elétrica. Uma vez que a constante dielétrica da água é muitas vezes superior à do ar é possível determinar a fração de cada um. A constante dielétrica pode ser medida utilizando uma de duas técnicas: pela variação da propagação do campo no tempo, um pulso eletromagnético é lançado entre duas varetas metálicas, enterradas na horizontal, no final das quais o pulso é refletido e pela velocidade de propagação calcula-se a humidade do solo; ou pode ser calculado utilizando uma frequência (estes sensores utilizam uma frequência de micro-ondas na ordem dos gigahertz), já que pela atenuação da amplitude e desfasamento da onda é possível obter resultados por comparação com valores de dielétricos conhecidos.

2.2.4 Métodos de determinação do potencial do solo

Os métodos de medição do potencial do solo focam-se na determinação do potencial matricial do solo. Este potencial é um indicador do teor de água adsorvida pelo solo. Os sensores de medição de potencial têm um alcance reduzido nas medições, mas são, por norma, mais baratos e fáceis de usar do que os métodos de determinação do teor

de humidade. Estes sensores podem ser de três tipos: tensiométricos; psicrométricos; ou resistivos.

Os sensores tensiométricos são dispositivos baratos e com um funcionamento simples. Um tensiómetro é composto por uma ponta porosa ligada a um reservatório cilíndrico que contém água e um sensor de pressão. Quanto mais seco estiver o solo, maior é a diferença de potencial entre o interior e o exterior do sensor, esta diferença atrai a água para fora através da ponta porosa, criando uma baixa pressão no interior do sensor. Esta baixa pressão é indicadora de quanta água existe no solo. Este tipo de sensor tem algumas desvantagens, necessita de manutenção periódica para repor o nível de água no seu interior e em regiões mais frias não pode ser utilizado no inverno, pois as temperaturas baixas podem congelar a água no seu interior tornando o sensor ineficiente.

Os sensores psicrométricos são mais difíceis de utilizar, e são usados em laboratório como referência para outros métodos. Este tipo de sensor é composto por uma câmara com um termopar e uma parede porosa. O termopar é arrefecido por efeito de *Peltier*, forçando a água a condensar na ponta fria, depois a água é deixada a evaporar, a evaporação da água baixa a temperatura do termopar, essa variação é medida e é assim possível aferir o potencial do solo. Este método é muito sensível, detetando rapidamente variações no potencial da água no solo, no entanto também é muito sensível a variações de temperatura e salinidade.

Sensores resistivos, como o nome indica utilizam a variação da resistência elétrica para determinar o potencial do solo húmido. São utilizados dois tipos de sensores: sensores que utilizam corrente alternada (AC); e sensores que utilizam corrente direta (DC). Ambos utilizam o mesmo princípio de funcionamento, em que a dois elétrodos enterrados é aplicada uma diferença de potencial elétrico, a corrente que passa entre os dois elétrodos é proporcional à resistência elétrica do solo. A resistência elétrica do solo varia com o teor de humidade.

Dos métodos aqui apresentados, nem todos são indicados para a utilização em sistemas de funcionamento autónomo. Medições pelo método direto de determinação do teor de humidade, métodos radiológicos, ou psicrométricos necessitam de um operador humano. As medições através de métodos tensiométricos, embora simples, necessitam de manutenção. Ficam então à escolha, para este estudo, os sensores capacitivos e resistivos. Destes, os sensores resistivos tendem a ser mais baratos.

2.2.5 Rega

A irrigação é uma prática milenar, praticada em todo o mundo para aumentar, ou mesmo garantir, a produção de alimento [7]. No meio agrícola são utilizadas várias técnicas para irrigar as culturas que têm vindo a evoluir com os avanços tecnológicos. Hoje em dia, em terrenos a descoberto, as técnicas (e tecnologias) mais utilizadas para irrigar os terrenos agrícolas no sudoeste alentejano são:

- Irrigação por Cheia - consiste na inundação de um terreno. Utiliza, tipicamente, a gravidade tanto para alagar a terra cultivada como para a drenar. Este tipo de rega é utilizado, por exemplo, na cultura do arroz.
- Irrigação por Regos - esta técnica utiliza regos na terra para distribuir a água pelo terreno, mantendo as plantas cultivadas à superfície. Este tipo de rega tradicionalmente utiliza a gravidade para distribuir a água pelos regos que cobrem o terreno,

no entanto, com o aumento da área cultivada por terreno, a gravidade já não é suficiente. Hoje em dia, em vez de tentar alisar perfeitamente o terreno, tentando dar-lhe o declive ideal para a água escorrer, são utilizados sistemas de rega com bombas elétricas capazes de regar vários regos de cada vez.

- Irrigação por Aspersores - a rega por aspersores é muito utilizada. Com esta técnica o terreno não necessita de ser nivelado. Esta funciona libertando a água em forma de jatos de água, e é geralmente utilizada em locais onde existem boas reservas de água. A aspersão pode ser efetuada de duas maneiras, com recurso a um pivô central, ou com aspersores ligados a tubagens de rega (este último torna este tipo de irrigação extremamente versátil).
- Irrigação Gota a Gota - é uma irrigação que funciona de forma contínua ou intermitente, e consiste em aplicar uma reduzida quantidade de água numa área localizada do solo. Tipicamente são utilizadas mangueiras perfuradas, ou com microaspersores perto da raiz de cada planta. Este método de rega tem um muito menor desperdício do que os anteriores, no entanto requer mais cuidado na sua montagem e é mais indicado para pomares ou culturas mais permanentes.

Nos sistemas referidos, apenas os últimos dois se enquadram no âmbito desta dissertação, pois estes utilizam válvulas de rega. Embora a aquisição de dados possa ser utilizada em qualquer terreno, a atuação de válvulas necessita, obviamente, de válvulas de rega.

2.3 Conceitos e tecnologias utilizados

Este capítulo é dedicado à introdução de alguns conceitos fundamentais nesta dissertação. São também apresentadas as tecnologias utilizadas, que na sua grande maioria consistem em *software*. Dois conceitos nos quais assenta a arquitetura geral deste trabalho são "rede industrial" e "Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados" (SCADA), são por isso ambos explicados nos próximos parágrafos. Para além destes conceitos são descritas outras tecnologias e linguagens de programação utilizadas.

2.3.1 Rede Industrial

As redes industriais têm como objetivo principal a monitorização e controlo de equipamento físico. São por isso redes hierarquizadas (ver figura 2.3), com ênfase no envio de pequenos pacotes de dados em tempo real. Isto pode levar à utilização de vários tipos de protocolos de comunicação à medida que se avança na hierarquia. Fisicamente estes sistemas podem cobrir áreas extensas em condições extremamente hostis com pó, grandes variações de temperatura, choque mecânico e ruído eletromagnético [10].

2.3.2 SCADA

Os sistemas de SCADA são, segundo [10], sistemas que englobam a camada de software que corre na unidade terminal mestre (MTU) e que efetua o controlo de hardware numa rede industrial. São normalmente compostos por uma (ou mais) aplicações cliente, responsáveis pela interface homem-máquina (HMI), e um servidor, responsável

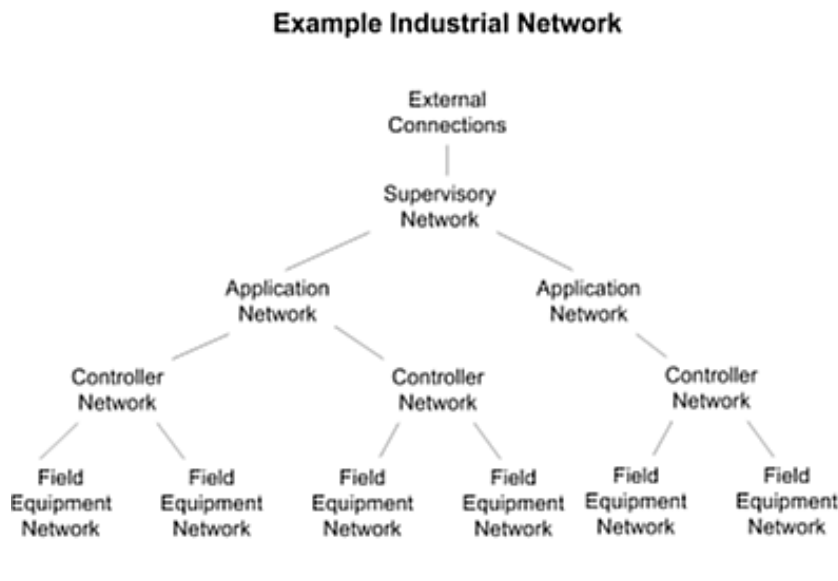


Figura 2.3: Exemplo de uma rede industrial [10].

pela aquisição e processamento de dados remotos, bem como de bases de dados e gestão da aplicação cliente. Os dados são transmitidos para unidades remotas (RTU) ou autômatos programáveis (PLC) e podem ser enviadas por diferentes meios físicos e utilizando diferentes protocolos. A figura 2.4 demonstra a arquitetura geral de um sistema de supervisão e aquisição de dados. Começando pelo lado esquerdo do esquema está a interface homem-máquina. Esta permite ao utilizador saber qual o estado do sistema e inserir comandos (se o sistema permitir ser alterado manualmente). De seguida está a unidade que processa a informação. A unidade terminal mestre comunica com bases de dados, atualiza a HMI e gera comandos conforme o estado das unidades terminais. Em penúltimo está a unidade responsável pela comunicação com as unidades remotas (à direita), esta comunicação pode ser feita por vários protocolos e meios físicos que são explorados em capítulos mais à frente.

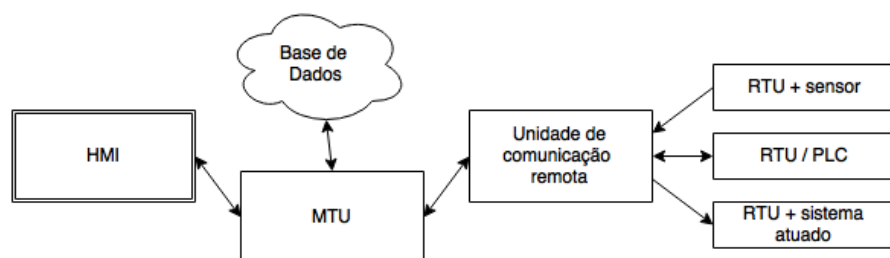


Figura 2.4: Arquitetura simplificada de um sistema SCADA.

Outras tecnologias relevantes nesta dissertação são:

- **HTML** - HyperText Markup Language, HTML, é a linguagem utilizada na construção de páginas web. Foi criada por Tim Berners-Lee e formalizada em 1990. É um documento composto por *tags* que é interpretado pelos navegadores web de

forma a criar no ecrã uma página legível e organizada. Atualmente é utilizada a versão HTML5 que é comumente utilizada em conjunto com *javascript* e *css* [11].

- HTTP - O Hypertext Transfer Protocol (HTTP) é um protocolo de comunicação na camada de aplicação do modelo OSI, e é utilizado para sistemas de informação de hipermedia, distribuídos e colaborativos [12]. É coordenado pelo World Wide Web Consortium e a Internet Engineering Task Force. Em 1999 foi definido o HTTP/1.1, e mais recentemente, em 2015 foi divulgada a versão HTTP/2 [13].
- JavaScript - *JavaScript* é uma linguagem de programação interpretada de alto nível. Foi inventada por Brendan Eich em 1995 e tornou-se uma linguagem estandardizada pela Ecma em 1997. O nome do standard é ECMA-262 e o nome oficial da linguagem é ECMAScript. Embora possa ser utilizada em várias situações, o seu uso comum é, em conjunto com HTML, criar páginas web dinâmicas e dotadas de alguma lógica interna [14]. Com recurso a *JavaScript* é possível implementar *AJAX*, uma tecnologia que permite alterar porções de uma página web sem ser necessário fazer *refresh* a toda a página [15]. Com esta tecnologia é possível criar páginas dinâmicas e atualizadas em tempo real para vários tipos de aplicação online.
- Arduino - *Arduino* é uma plataforma aberta (*open-source*) com *hardware* e *software* próprio que procura simplificar o processo de programação de microcontroladores. É por vezes utilizado como base por trás de produtos existentes no mercado e como solução para problemas domésticos. Uma vez que é aberto a uma comunidade online existem numerosas bibliotecas livres que aceleram o desenvolvimento de produto em *Arduino*. A plataforma de *Arduino* possui uma linguagem própria com base em C/C++, e disponibiliza ainda um ambiente integrado de desenvolvimento (IDE) para facilitar a programação de microcontroladores compatíveis [16].
- C++ - A linguagem C++ é uma linguagem compilada de uso geral, que permite efetuar manipulações de baixo nível, sendo no entanto orientada por objetos. Foi inicialmente criada na década de 1980 por Bjarne Stroustrup com o objetivo de fazer uma linguagem rápida, portátil, e com mais funcionalidades do que as linguagens correntes na altura. É uma linguagem de alta performance que permite um desenvolvimento mais simples do que linguagens como C [17]. O seu uso em linguagens como a utilizada pelo *Arduino* veio tornar a programação de microcontroladores mais simples.
- Ruby - *Ruby* é uma linguagem de programação de alto nível e orientada por objetos. Como é interpretada pode ser instalada em diferentes sistemas operativos. Esta linguagem foi desenvolvida com o programador em mente, isto é, foi criada de forma a tornar a criação de código rápida e simples. Embora o princípio de funcionamento torne os programas mais "lentos", o processo de desenvolvimento é menos moroso. *Ruby* é *open-source*, livre para ser modificada e distribuída [18]. A linguagem *Ruby* possui *gem's*, que são bibliotecas criadas para fins específicos. Nesta dissertação são usadas as *gem's*: *Amalgalite*, que permite a utilização de *SQLite* [19], *Bcrypt*, que implementa o método *bcrypt* [20], *csv*, que permite escrever e ler rapidamente ficheiros *csv* [21] e *Logger*, para registar erros e a utilização do servidor [22].

- SQLite - *SQLite* é uma biblioteca escrita em linguagem C que implementa uma base de dados. *SQLite* não necessita de configurações, nem servidores remotos. Com esta biblioteca é possível criar uma base de dados no disco local. Esta biblioteca fornece uma alternativa prática quando comparada com as bases de dados remotas convencionais. *SQLite* é utilizada por plataformas como *Facebook* e *Mozilla* e é apontado como uma ótima solução para pequenas aplicações [23].

2.4 Estudos incidentes na monoturização e controlo de sistemas de rega

Nesta secção são apresentados três estudos que incidem sobre a monitorização e controlo de rega. Das tecnologias e conclusões destes é possível criar uma base para o corrente estudo.

2.4.1 Otimização dos consumos de água na irrigação de campos de golfe

Na dissertação de mestrado de [24] é endereçada a ineficiente utilização de recursos hídricos na irrigação de espaços verdes com foco em campos de golfe. Os campos de golfe são grandes consumidores de água e à data do estudo, em Portugal, existiam 79. Tendo em conta que um só campo de golfe de 60 hectares pode consumir por dia 2500 metros cúbicos de água e que os métodos de irrigação nem sempre são os mais corretos, encontra-se aqui um problema que pode ser resolvido. Para reduzir o consumo de água é proposto um sistema de baixo custo, que possa ser adquirido para uso doméstico ou industrial, que monitorize as condições climáticas (temperatura, humidade e velocidade do vento) para escolher quais as horas do dia e quantidades de água mais adequadas para rega. A arquitetura do sistema (em detalhe na figura 2.5) também prevê a comunicação sem fios entre o *Master* e os *Slaves* de forma a reduzir o custo do uso de cablagem. A implementação deste estudo está dividida em três partes, *hardware*, *software* e comunicação.

O *hardware* utilizado pode ser visto em dois blocos, *master* (ou unidade mestre) e *slave* (ou unidade terminal). A unidade mestre é composta por: um μC , como unidade de processamento; um módulo RF, para comunicação com os *slaves*; um módulo Real Time Clock (RTC) para calendarização de rega e relógio da unidade; e por fim um computador como interface homem-máquina. A unidade remota é composta por uma unidade de comunicação e processamento: um μC , como unidade de processamento; um módulo RF, para comunicação com o *master* e para outros *slaves*; esta unidade comunica com sensores e atuadores. No computador corre o software responsável pela interface homem-máquina.

De forma a estender o alcance da transmissão de dados por rádio frequência, são usadas unidades cuja função é retransmitir mensagens provenientes das unidades que contêm sensores. Para estas unidades intermédias foi criado um algoritmo que, através da mensagem e da sua validade, determina se descarta ou reencaminha a informação recebida. Após a validação da mensagem (que é determinada pela verificação cíclica de redundância ou CRC), o nodo em questão avalia se a mensagem lhe é destinada. Se sim, a mensagem é processada, e é criada e enviada uma resposta de confirmação. Se não, verifica se o

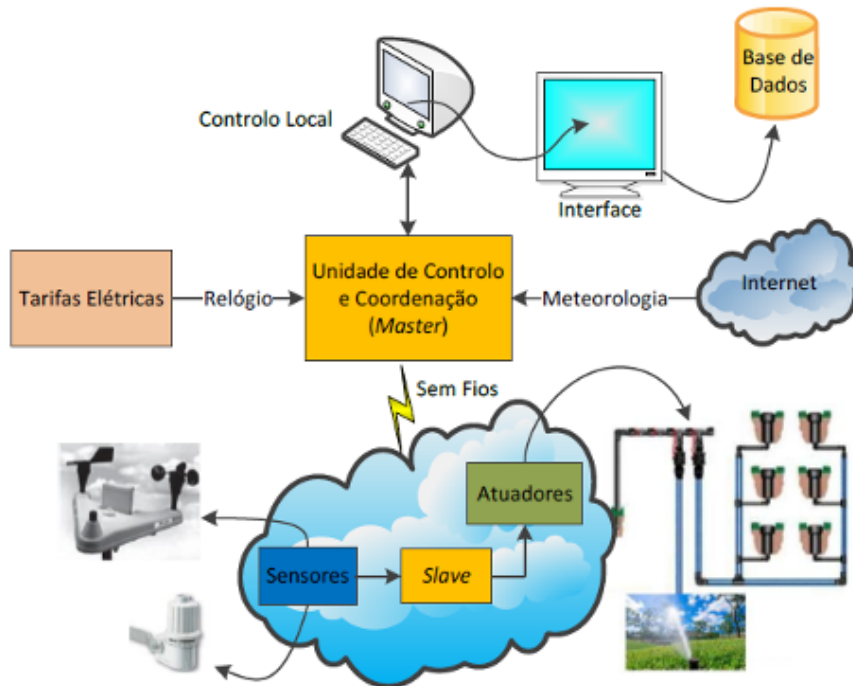


Figura 2.5: Arquitetura proposta por [24].

endereço pertence à atual rota de transmissão. Caso não pertença, a mensagem é descartada, se pertencer, decrementa o valor do *time to live* (TTL), se o TTL não for zero a mensagem é reencaminhada, se for zero é descartada.

O sistema de comunicação deste estudo permite comunicar até 2800 metros e manter registos tanto dos sensores como das previsões meteorológicas. Foi testado durante quatro dias e cumpriu sempre o horário de rega. Ficam lançados neste estudo os próximos passos: criar uma página online para monitorização da rega, adicionar sensores (como caudalímetros) e tornar energeticamente autónomas as unidades remotas.

2.4.2 Automação da irrigação para melhoria da eficiência energética em lavouras de arroz

No artigo *Automação da irrigação para melhoria da eficiência energética em lavouras de arroz*, de [25], explora-se a problemática do uso excessivo de água na produção de arroz. O arroz cresce submerso e para ser cultivado as bordas do terreno são elevadas de forma a manter uma lâmina de água constante. Visto que a rega é efetuada em terrenos que não são estanques, é necessário repor a água que se infiltra. Tradicionalmente, isto é feito com um fluxo de irrigação constante e, de forma a manter a altura da lâmina de água constante, o excesso transborda para fora do campo. Este procedimento é não só ineficiente na forma como é usada a água, mas também implica o uso contínuo de bombas de água, o que é um gasto energético constante.

Para controlar estes gastos foi pensado um sistema de SCADA. O controlo do nível da lâmina de água passa a ser feito com as bombas de água que só são atuadas quando o nível da lâmina de água é suficientemente baixo. Como se pode ver na figura 2.6, a altura da lâmina (medida em milímetros), é monitorizada por sensores de ultrassons.

Os sensores comunicam, numa rede sem fios, com o controlador das bombas que regula o seu caudal, desligando-as quando não são necessárias. O controlador comunica, por General Packet Radio Service (GPRS), com um computador central que supervisiona todo o sistema. Com este sistema é possível adquirir e guardar dados do funcionamento dos componentes, bem como acertar parâmetros dos mesmos. Para a implementação ser

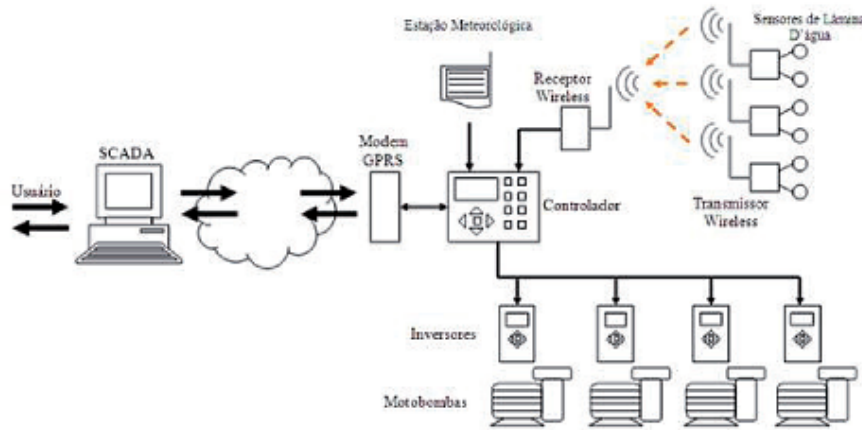


Figura 2.6: Esquema físico do sistema de controlo [25].

viável é necessário criar um algoritmo de controlo. Na figura 2.7 podemos perceber como foi implementado o controlo da rega (2.7a), bem como a representação gráfica do uso das bombas (2.7b). Para o controlo do nível foi criado um intervalo de referência REF , onde $REF_{min} < REF < REF_{max}$, em milímetros. Quando as bombas são ligadas é verificada a altura de água, se esta for menor que REF_{min} as bombas são ligadas no caudal máximo, se a altura for maior que REF_{min} e menor que REF_{max} as bombas são ligadas com um caudal médio, se a altura for maior que REF_{max} as bombas são desligadas.

Embora só tenha sido projetado para uma altura da safra, não podendo por isso otimizar o consumo de água em todas as etapas da produção do arroz, no processo da lavoura o controlo da lâmina de água conseguiu reduções de 85.2% no uso de água e 81.3% no uso de energia elétrica.

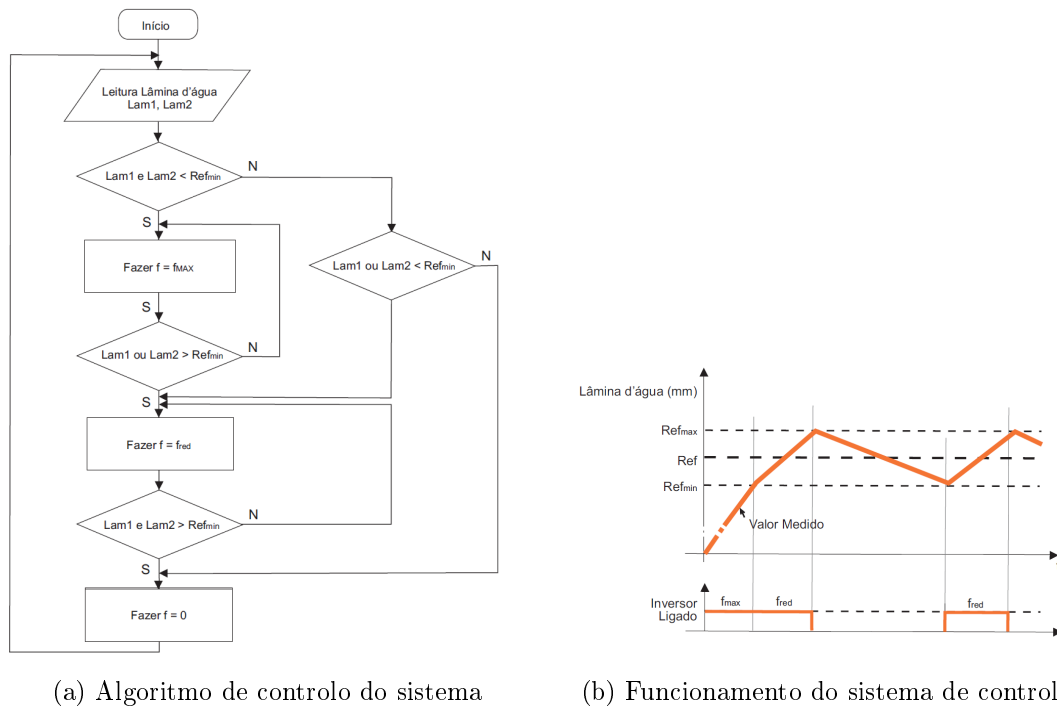


Figura 2.7: Algoritmo à esquerda e funcionamento do sistema à direita. Adaptado de [25].

2.4.3 Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module

No artigo *Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module*, de [26], é efetuada a monitorização e o controlo da irrigação de sávia em estufas localizadas perto de San Jose del Cabo, na Baja California Sur, Mexico. As estufas são ambientes relativamente isolados, com níveis de temperatura e humidade controlados. Neste estudo, o controlo da irrigação é feito em função do teor de humidade do solo e a temperatura do ar. Para monitorizar estes parâmetros são utilizadas RTU, compostas por: sensores de teor de humidade do solo capacitivos e sensores de temperatura, controlados por um microcontrolador (PIC24FJ64GB004), que utiliza um módulo *XBee* para comunicar com a MTU. A MTU é responsável pela aquisição dos dados dos sensores, criação de uma base de dados e ainda envio de dados para um servidor online. Esta unidade é composta por: um microcontrolador (PIC24FJ64GB004), que controla um modem GPRS (MTSMC-G2-SP); um módulo *Wi-Fi XBee*; e relés, que ligam ou desligam as bombas de rega de 12 V.

O sistema funciona com base em temporizadores. Cada unidade possui um relógio que é utilizado para vários fins. Em intervalos predefinidos de tempo o relógio ativa o μC e este começa a rotina de medição e comunicação de dados. Tal como representado na figura 2.8, para otimizar a eficiência energética as RTU's, estão normalmente num estado de *stand by*, são acordadas pelo RTC para executar a rotina de medição e envio de dados e voltam ao estado de *stand by*.

Em conjunto com a rega, que depende do teor de humidade e temperatura do solo, também é efetuada uma rega calendarizada. Esta rega periódica tem como objetivo fornecer

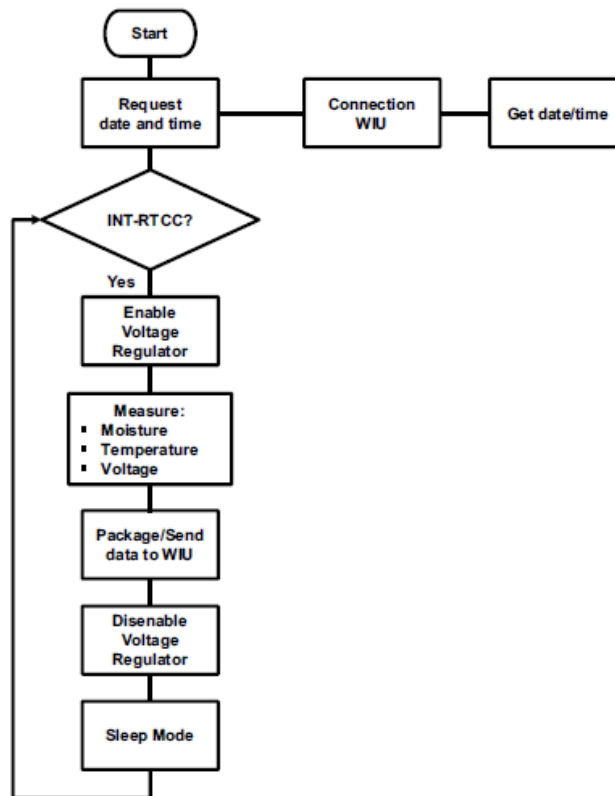


Figura 2.8: Algoritmo de funcionamento da unidade remota [26].

as plantas com a quantidade mínima de água necessária, sendo utilizadas as medições do solo para cobrir as restantes necessidades das culturas. A MTU nunca é colocada em *stand by*, pois tem de estar sempre apta a receber, não só o estado dos sensores, mas também tem que verificar se algum sensor foi adicionado à rede. Como se observa na figura 2.9, uma vez ligada, a unidade mestre conecta-se à web para atualizar o seu relógio, em seguida verifica se:

1. algum sensor novo se ligou;
2. o temporizador está a indicar que é necessário regar ou enviar informação para o servidor web;
3. o nível de humidade do solo ou a temperatura estão, respetivamente a baixo ou acima dos seus limites;
4. e por fim verifica se está ligada a rega manual.

Esta implementação mostrou-se capaz de otimizar o uso de água sem penalizar a colheita, consumindo 60% a 90% menos água que o método tradicional. Esta diminuição no consumo de água é suficiente para rentabilizar o investimento nesta tecnologia.

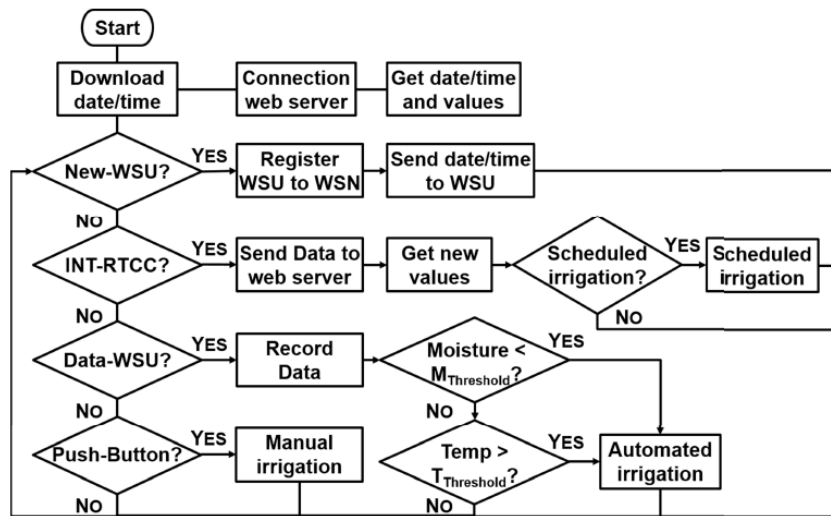


Figura 2.9: Algoritmo de funcionamento da unidade mestre [26].

2.5 Soluções comerciais

Nesta secção são estudadas as soluções já existentes no mercado para a monitorização e controlo da rega, sendo analisados os pontos fortes e as lacunas dessas soluções.

As empresas têm tido uma forte aposta em controladores programáveis fixos, isto é, que necessitam de uma infraestrutura fixa com ligação a uma fonte de energia da rede, com controlo de válvulas por cabo e com temporizadores localmente programáveis. Estas soluções são facilmente aplicáveis em pequenos terrenos e estufas. Tais soluções implicam a construção de linhas de água e de potência para atuar as válvulas. No caso de temporizadores torna-se necessário que haja uma deslocação ao local de rega para programar e começar ciclos de rega.

Este tipo de soluções tenderá a cair em desuso, pois os agricultores nem sempre são os donos dos terrenos que cultivam, e mesmo que o sejam, o investimento em infraestruturas e ligação à rede elétrica, é um encargo adicional que acrescenta custos de produção. Atualmente muitas marcas já oferecem outras soluções com menos restrições. Nestas, a monitorização é feita por estações energeticamente autónomas, capazes de comunicar com uma rede de sensores e com um controlo central através de uma rede sem fios.

Algumas empresas que têm investido e desenvolvido produtos nesta área são, por exemplo, a *RainBird®*, a *DIG Irrigation Products®*, a *WiSA Irrigation Solutions®*, a *Aquagri®* e a *Hidrosoph®*. Todas oferecem soluções de monitorização de rega e do estado do terreno com o apoio de sensores e estações meteorológicas. Com os dados recolhidos muitas empresas oferecem serviços de aconselhamento, nestes serviços são calculados os volumes de água necessários para cada cultura.

A *Rain Bird®* registou a primeira patente em 1990 e desde essa altura tem vindo a inovar a tecnologia de rega. Atualmente a *Rain Bird®* possui mais de 30 marcas registadas que representam os seus produtos de rega doméstica e industrial a nível mundial. A sua atividade comercial estende-se desde a venda de pequenos componentes como válvulas, aspersores e sensores, até sistemas de rega completos de grandes dimensões, que utilizam software de controlo, por exemplo para irrigação de campos de golfe [27].

A *Rain Bird®* possui três sistemas de SCADA para o controlo de rega. *Maxicom²*, *Site Control* e *IQTM* são sistemas que permitem o controlo de irrigação industrial e comercial. Estes sistemas utilizam um computador como unidade mestre e através de telefone, rádio ou telemóvel ou *ethernet* (em ligações por cabo ou GPRS) controlam vários locais, estações meteorológicas ao mesmo tempo, válvulas e caudalímetros. A programação da rega pode ser feita através de horários fixos, da evapotranspiração do solo e previsões meteorológicas. Estes sistemas também oferecem monitorização de fugas de água, sendo capazes de cortar a alimentação de água a um setor danificado, ao mesmo tempo que lançam um aviso. Embora extremamente completos, estes sistemas são muito dispendiosos e requerem a compra não só de vários modelos físicos, mas também do software.

A *DIG* é uma empresa que se especializou em rega amiga do ambiente. Os produtos que disponibilizam englobam desde válvulas, sensores e aspersores, para uso doméstico, até controladores para válvulas e sistemas de controlo de rega com base nas condições atmosféricas e evapotranspiração do solo para jardins e campos [28].

O sistema *LEIT-2ET* oferece controlo de rega com base nas condições atmosféricas, é composto por uma estação meteorológica, pelas válvulas de rega e por um aparelho que permite a programação do sistema. Neste caso, o software de controlo corre nos componentes físicos do sistema. A comunicação entre os componentes, válvulas, estações meteorológicas, etc., é feita por uma rede *wireless*. A programação dos limites de rega e a interface homem-máquina é feita por pequenos ecrãs nos aparelhos, ou por um aparelho programador que comunica com a rede de sensores e atuadores.

A empresa *WiSA*, foi fundada na Austrália em 1996, tem como objetivo aumentar a eficiência dos sistemas de irrigação. Tendo o ênfase na monitorização e controlo, os produtos desta empresa são equipamentos de comunicação sem fios, módulos de controlo para aquisição de dados dos sensores e atuação de válvulas, sensores e *software* de controlo [29].

O *AquaLink* é o *software* de SCADA que, tirando partido dos sistemas físicos implementados no campo e com recurso a previsões meteorológicas, controla a irrigação do solo. Assim como os produtos anteriormente referidos, o *AquaLink* é capaz de enviar avisos em tempo real e controlar vários campos em simultâneo.

A *Aquagri*, fundada em 1998, é uma empresa especializada em serviços e equipamentos de gestão de água de rega, oferece serviços de consultadoria para a gestão de rega e tecnologia de monitorização baseadas na Internet com recurso a *software* de análise de dados. Tem como especialidade a cultura de vinha, olival, morangos, framboesas, mirtilos, batata, tomate, milho, hortícolas e ainda relvados de golfe [30].

A empresa *Hidrosoph* foi fundada em 2008 com o objetivo de disponibilizar as tecnologias de rega inteligente ao maior número de regantes, e assim por em prática mais de 20 anos de experiência nesta área. A *Hidrosoph* possui a sua própria metodologia de gestão de rega inteligente, esta tecnologia é utilizada no *software Hidrovolution* com a qual é obtido o aconselhamento ao agricultor [31]. São fornecidos três produtos, *Irristat*, *Irristat Mobile* e *Irristat BI*, que não só disponibilizam informação sobre o estado das culturas, mas também procuram encontrar relações nos dados recolhidos de modo a otimizar a produtividade das culturas.

Após investigar as soluções disponíveis neste momento no mercado é possível verificar uma tendência comum entre todas. Estas soluções são pensadas para aplicações permanentes ou de longa duração. A sua maioria necessita da construção de infraestruturas,

ou de mão de obra especializada para ser instalada. Desta forma não são uma solução viável para terrenos remotos e terrenos arrendados nos quais não se queira (ou não se possa) fazer investimentos perenes e substantivos. No entanto, conjugando estas soluções comerciais com as tecnologias exploradas nos estudos apresentados é possível idealizar uma solução que cumpra os requisitos do corrente estudo.

No capítulo 3 é estabelecida uma proposta que utiliza tecnologias de redes sem fios para adaptar as soluções existentes às exigências neste estudo apresentadas.

Capítulo 3

Solução Proposta

3.1 Conceito

Neste capítulo é pensada uma solução conceptual para o problema da monitorização e controlo de irrigação, com especial atenção ao contexto da agricultura do sudoeste alentejano onde é necessário criar alternativas aos sistemas de rega tradicionais. A otimização da irrigação dos solos agrícolas e consequente salvaguarda dos recursos hídricos pode, não só ajudar a garantir o funcionamento do setor em anos de forte seca, como pode ainda beneficiar financeiramente as empresas reduzindo os custos com deslocações, falhas de sistemas de irrigação, consumo de água e energia (elétrica e derivada de combustíveis fósseis).

A solução pensada para resolver este problema destaca-se das soluções apresentadas no capítulo Revisão do Estado da Arte, pois parte de um pressuposto diferente. Por norma as soluções correntemente usadas focam-se apenas na monitorização, não fornecem atuação remota da rega, e quando o fazem, não oferecem uma solução que se adapte a um sistema já existente, ou que não requeira mão de obra especializada. Por outro lado, estas soluções necessitam de mão de obra especializada (para serem operadas ou reposicionadas) ou podem necessitar de infraestruturas fixas, construídas no terreno. Como uma grande percentagem dos campos agrícolas não pertencem à empresa que o explora, existe uma limitação nos equipamentos e infraestruturas utilizadas no terreno. Num terreno arrendado nem sempre é possível construir infraestruturas, e mesmo quando é permitida a construção, esta pode não ser uma opção viável, ou por ser um investimento demasiado elevado para a dimensão do terreno (a dimensão do terreno não lhe permite gerar lucro), ou o terreno pode não estar arrendado pelo tempo necessário para justificar o custo e o tempo de preparação do mesmo. Desta forma a solução terá de ser leve, portátil e fácil de utilizar, evitando assim a que seja necessário construir ou pagar o serviço extra da mão de obra para estes sistemas.

De uma forma geral terá que ser integrado o seguinte *hardware*:

1. sensores de medição de humidade do solo;
2. sensores de medição de temperatura e humidade do ar;
3. sensores de medição de caudal e/ou pressão do sistema de rega;
4. atuadores para válvulas de rega;

5. módulos de comunicação sem fios de curta e longa ¹ distância.

E o software deverá ser capaz de:

1. adquirir e armazenar o valor da humidade do solo;
2. adquirir e armazenar o valor da humidade e temperatura do ar;
3. adquirir e armazenar o valor de caudal e/ou pressão;
4. verificar o estado da rega;
5. criar horários de rega;
6. enviar ordens para atuar válvulas;
7. criar uma interface para o utilizador;
8. representar o estado atualizado do sistema na interface;
9. enviar avisos ao utilizador quando existirem situações irregulares.

A tecnologia atual tem evoluído segundo um novo paradigma, a *internet das coisas*, cujo princípio passa por dotar os objetos do dia a dia com poder de processar e transmitir informação através da *internet*. Desta nova mentalidade têm surgido microcontroladores (μC) cada vez mais potentes e com a capacidade de comunicar sem fios. Tirando partido deste tipo de μC , e com base no modelo cliente/servidor, é sugerida a arquitetura da figura 3.1, onde os sensores e os atuadores no terreno comunicam com a unidade *mestre* sem a necessidade de cabos de comunicação, libertando assim o campo de cultivo e facilitando a passagem de máquinas.

Na arquitetura proposta, a cada campo de cultivo é atribuído um sistema de retransmissão de dados (unidade *mestre* do terreno), esta faz a ponte entre os sensores e atuadores no terreno e o sistema de monitorização e controlo e a base de dados. Este sistema "corre" na unidade *mestre* que é não só responsável pela gestão da base de dados, mas é também responsável por gerar a interface homem-máquina via uma página web.

Unidade *mestre* do sistema de monitorização e controlo de rega

A monitorização e controlo da rega é efetuada por uma unidade *mestre* (MTU), que desempenha o papel de servidor. Esta deve estar encarregue de armazenar horários de rega para cada campo de cultivo, gerir uma base de dados com os registos dos sensores, gerar páginas web para interface homem-máquina e lançar avisos ao utilizador.

O planeamento de rega é criado pelo utilizador (encarregue de gerir o terreno para cultivar), a quem é fornecida informação dos sensores no terreno (temperatura do ar, humidade relativa do ar e humidade do solo).

Este sistema deve também permitir definir valores mínimos de humidade do solo e máximos e mínimos de temperatura do ar para lançar avisos e até dar início a um ciclo de rega. Desta forma são evitadas situações extremas, por exemplo, quando a temperatura for muito elevada ou a humidade muito baixa a rega pode ser ativada por um tempo predefinido.

¹Onde por curta distância se entende 0 a 150 metros, e por longas distâncias se entendem distâncias superiores a 1 quilómetro.

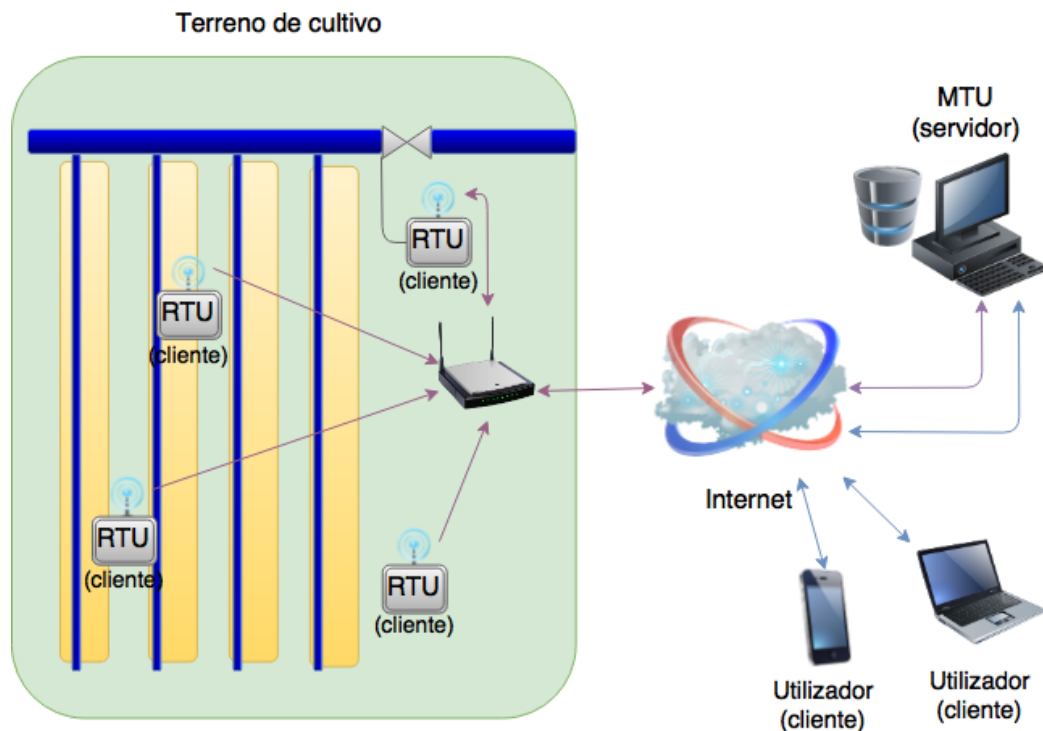


Figura 3.1: Sugestão de solução.

Sistema de retransmissão de dados

A retransmissão de dados de cada terreno é efetuada pela sua unidade *mestre* de cada terreno. Esta unidade *mestre* tem a capacidade de aceder à internet a partir de pontos remotos (por exemplo utilizando dados móveis, ou redes locais) para comunicar com a unidade *mestre*. Da unidade *mestre* recebe os planos de rega que encaminha para os módulos atuadores, para a MTU envia os dados recolhidos pelos módulos de sensores. No fundo, este sistema funciona apenas como um ponto de ligação à web.

Módulos

No terreno são utilizados módulos, que neste caso representam unidades remotas do sistema, e são encarregues de adquirir dados (com recurso a vários sensores) e atuar válvulas de rega. Pensaram-se dois tipos de módulos, sensores e atuadores, cada um com especificações diferentes.

Os módulos sensores são utilizados junto às culturas e não necessitam de ter a capacidade de atuar válvulas, a sua função é recolher informação sobre o estado do solo em diferentes pontos do terreno. Estes módulos têm que ser muito resistentes à água e ao pó, têm que ser compactos, fáceis de instalar e configurar, e têm que ser capazes de gerar e armazenar a sua própria energia, pois dois dos requisitos do projeto são evitar a obstrução do campo e facilitar a utilização desta tecnologia.

Os módulos atuadores, para além dos requisitos cumpridos pelos sensores, têm também que atuar válvulas de rega e responder a comandos em mais curtos espaços de tempo. Se o sistema de rega estiver ativo, o tempo de resposta deve ser inferiores a um minuto, pois

pode ser necessário para a rega devido a uma falha ou rutura no sistema de abastecimento de água.

3.2 Hardware

Neste capítulo é exposto o *hardware* que se pensa usar. Este está dividido em duas categorias, a parte eletrónica e a parte mecânica (a blindagem do aparelho). Nos parágrafos seguintes é feita uma primeira análise das tecnologias a utilizar, e da sua possível implementação.

Não é discutido neste capítulo o *hardware* da unidade *mestre* do sistema de monitorização e controlo de rega, pois para um projeto desta escala este não é relevante (quer isto dizer que um computador com um sistema operativo atualizado deve ser capaz de correr o software).

3.2.1 Sistema de retransmissão de dados

O sistema de retransmissão de dados é o nodo central do terreno a partir do qual se dá a comunicação a longa distância com a unidade *mestre*. Este pode tomar várias formas, neste contexto representa um *access point*. Numa primeira tentativa de criar uma solução para esta unidade foi pensada uma arquitetura com base num microcontrolador. Esta solução implicaria a utilização de vários componentes, *modems GSM/GPRS* para a comunicação sem fios com o servidor, um *modem Wi-Fi* para comunicar com os módulos, baterias, circuitos de proteção, teclado e ecrã para HMI e tudo isto teria de ser programado e testado. Por ter um custo de desenvolvimento elevado esta opção foi rapidamente abandonada.

A segunda opção é utilizar um *smartphone*. Um *smartphone* tem grandes vantagens quando comparado com a primeira solução. Em primeiro lugar, não tem "tempo de desenvolvimento", já contém todo o hardware anteriormente referido, que é necessário para a função que vai desempenhar, e em segundo lugar é possível utilizar este dispositivo para configurar os módulos e aceder ao servidor, mesmo se o agricultor não possuir um *smartphone*.

Por último, existe também a opção de utilizar um *router GSM*. Esta é uma opção natural e potencialmente mais robusta e barata.

Para uma aplicação final deste sistema sugere-se a utilização de um *router* comercial. No entanto um *router* é menos versátil do que o *smartphone* quando é necessário testar o funcionamento do sistema. Por esta razão, neste estudo optou-se pela utilização de um *smartphone*.

3.2.2 Módulos sensores e atuadores

Indo ao encontro dos objetivos do projeto, ambos os módulos devem possuir *hardware* com as seguintes características:

1. capacidade de processar informação proveniente de sensores, e comandos da unidade *mestre*;
2. capacidade de comunicar sem fios;

3. autonomia energética;
4. uma interface física através da qual recebam *input* do utilizador e expressem o seu estado de funcionamento;
5. uma blindagem impermeável, robusta e de fácil transporte.

Para cumprir com os dois primeiros pontos da lista anterior, foi escolhido um microcontrolador de acordo com a arquitetura da figura 3.2.

A autonomia energética poderá ser resolvida recorrendo a uma de duas opções: ou utilizar pilhas, que tem que ser trocadas periodicamente; ou baterias recarregáveis. As pilhas são uma opção utilizada com frequência em programadores de rega, no entanto apresentam mais uma preocupação para o utilizador e são um meio de poluição evitável. Utilizar uma bateria, em conjunto com um painel solar, pode tornar os módulos completamente autónomos.

Para ligar e desligar os módulos, bem como para averiguar e modificar o seu modo de funcionamento, estes devem possuir interruptores e led's, uma interface física com a qual o utilizador possa interagir. No entanto os módulos podem precisar de ser configurados e para isso necessitam de uma HMI. Tirando partido das características do microcontrolador escolhido esta interface pode ser dada através de uma página HTML lançada pelo módulo.

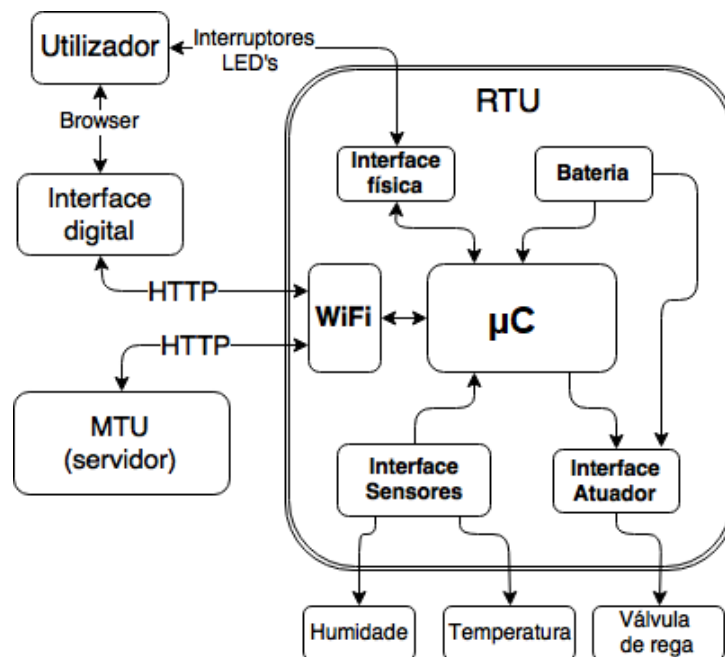


Figura 3.2: Arquitetura simplificada dos módulos.

Atuadores

Os módulos atuadores são responsáveis por atuar as válvulas de rega, para tal necessitam de fornecer correntes elétricas com elevada intensidade de corrente. Uma vez que a maior parte dos microcontrolador não é capaz de receber ou fornecer mais do que

alguns miliamperes (cerca de 20 mA), é necessária a criação de um circuito encarregue de lidar com as correntes mais elevadas. A blindagem do atuador deve também conter um ligação para a válvula de rega, de tal forma que seja de fácil montagem/desmontagem, mas que permaneça ao abrigo da água.

Sensores

Os módulos sensores são responsáveis pela leitura periódica dos valores de temperatura e humidade do solo e ar. Deve por isso permitir a utilização de vários sensores em simultâneo. A blindagem deve possuir conectores de encaixe rápido para fácil troca de sondas externas.

3.3 Software

Neste projeto é necessário desenvolver *software* para dois dos seus componentes, tanto a unidade *mestre* do sistema de monitorização e controlo de rega, como os módulos atuadores necessitam de *software* próprio para as funções que desempenham. Nos próximos capítulos são exploradas opções para o desenvolvimento de *software*.

3.3.1 Unidade *mestre* do sistema de monitorização e controlo de rega

Este sistema é a camada mais elevada da cadeia de SCADA e desempenha duas funções distintas, tal como sugerido na figura 3.3.

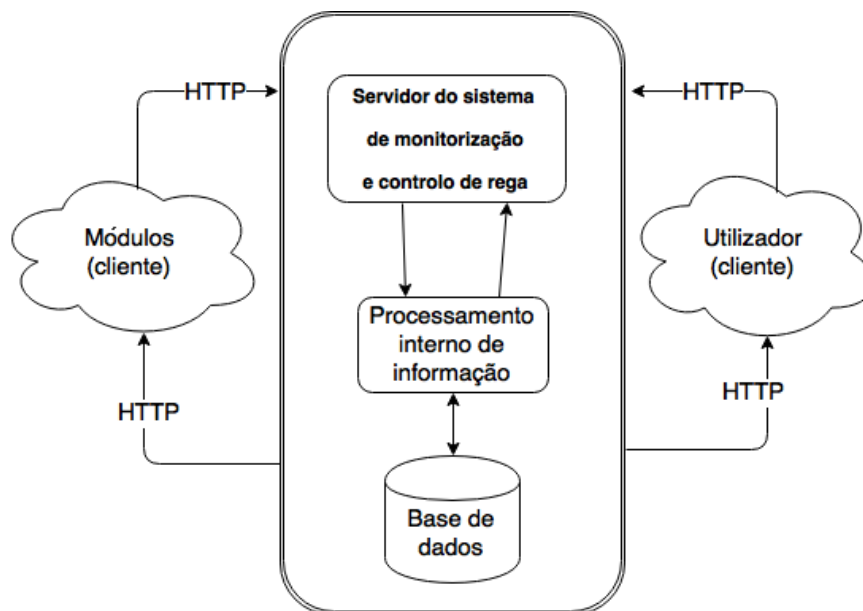


Figura 3.3: Sugestão de funcionamento da unidade *mestre* do sistema de monitorização e controlo de rega.

Em primeiro lugar esta camada de *software* será responsável por gerir os módulos. Receberá um pedido HTTP com informação dos módulos nos diferentes campos de cul-

tivo, verificará se são mensagens válidas e responderá de acordo, emitindo um "erro", ou um "ok" e um comando a executar pelo módulo, em vez de servir uma página web convencional. Caso o pedido seja válido a mensagem é processada e a informação relevante é armazenada na base de dados. A segunda função é servir páginas web (tal como um servidor convencional) que são a interface entre o utilizador e o sistema. Através das páginas alojadas no servidor é possível ver qual o estado dos terrenos, definir horários de rega e atuar válvulas de rega remotamente.

Para concretizar o servidor foram pensadas três opções, utilizar uma distribuição do *Apache* (por exemplo *XAMPP*), escrever um servidor (HTTP) e software dedicado em *VB* (*Visual Basic*), ou em *Ruby*. O *software XAMPP* é muito robusto e bastante utilizado, no entanto pode levantar dificuldades na comunicação com o microcontrolador. *Ruby* e *VB*, permitem a criação de um servidor mais simples e adaptado às necessidades deste projeto. Embora o *Visual Basic* tenha ferramentas poderosas em ambiente *Windows*, a linguagem *Ruby* tem um tempo de desenvolvimento mais curto, e pode ser instalada em qualquer sistema operativo. Não foi considerada na escolha de opções a performance, pois à escala deste estudo a diferença é negligenciável.

3.3.2 Módulos

Os módulos sensores e atuadores, como já foi referido, têm como base um kit de desenvolvimento com *Wi-Fi*. O μC pode ser compatível com o IDE do *Arduino*, isto é uma vantagem, uma vez que na comunidade online do *Arduino* estão disponíveis inúmeras bibliotecas que reduzem o esforço de desenvolvimento necessário. Das bibliotecas disponíveis destacam-se algumas de grande interesse que permitem utilizar sensores de temperatura e humidade, comunicação série. Existem também bibliotecas que permitem utilizar as capacidades de comunicação *Wi-Fi* de alguns μC 's implementando o protocolo HTTP.

3.4 Interações no sistema

Neste sistema existem dois tipos de clientes distintos, os módulos e o utilizador (entenda-se agricultor/gestor do terreno). Em ambos os casos o servidor aguarda um pedido e responde em conformidade, assim como representado na figura 3.4, e gere a troca de dados entre clientes e base de dados como demonstrado na figura 3.5.

Os módulos emitem pedidos com a informação obtida do terreno e recebem um comando que pode conter: a identificação de um erro na comunicação, um tempo de hibernação, uma ordem de início de um ciclo de rega.

O utilizador faz um pedido de forma a receber a interface homem-máquina. Uma vez carregada a interface são efetuados vários pedidos para alterar tempos de hibernação e atualizar a interface com os dados mais recentes obtidos no terreno.

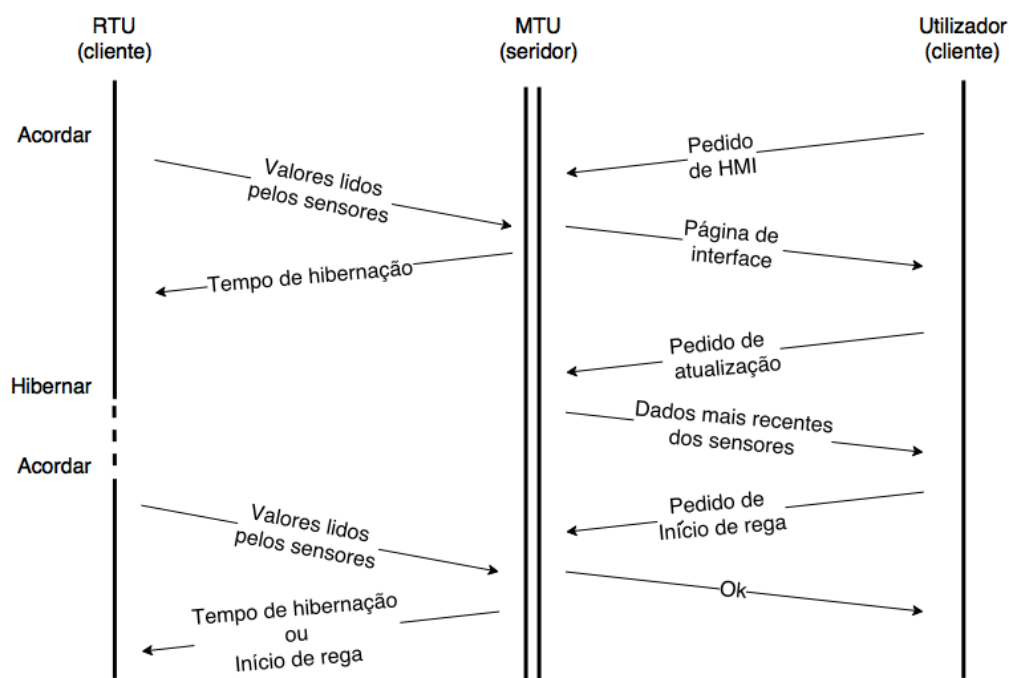


Figura 3.4: Diagrama de comunicação entre clientes e servidor.

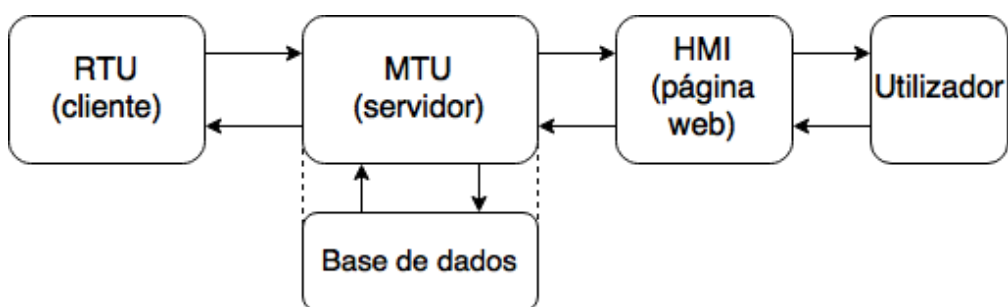


Figura 3.5: Relação entre clientes e servidor.

Capítulo 4

Implementação

Neste capítulo é concretizado o projeto, são discutidas as escolhas feitas e é explicado o *software* e o *hardware*. A figura 4.1 esboça o resultado final que se pretende alcançar. No terreno os módulos sensores são instalados onde o agricultor necessitar de recolher informação sobre a humidade e temperatura do ar e do solo, o módulo atuador é instalado na linha de rega principal. Periodicamente os módulos comunicam com a unidade mestre de forma a atualizar o estado do terreno e verificar se é necessário iniciar um ciclo de rega. Por outro lado, a partir de qualquer localização com acesso à internet, o agricultor pode observar o estado de um terreno à escolha e alterar o seu horário de rega.

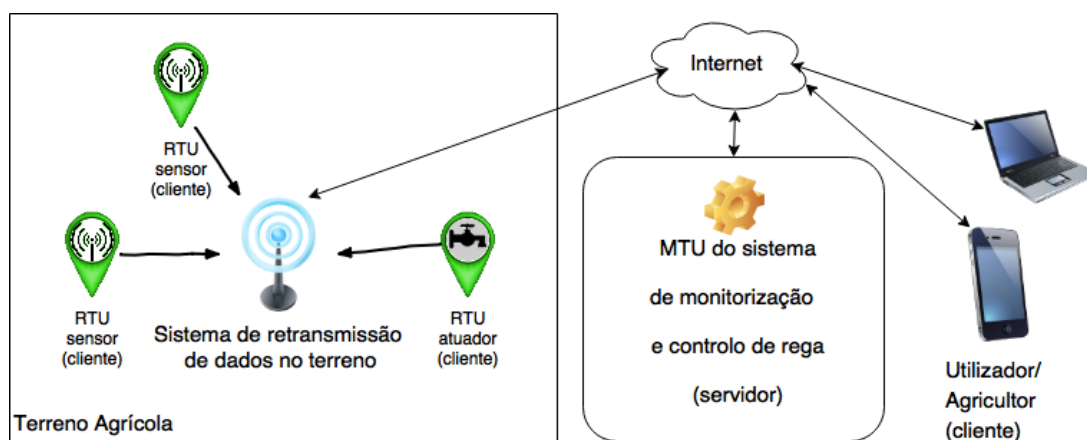


Figura 4.1: Esboço da solução que se pretende obter.

4.1 Unidade mestre do sistema de monitorização e controlo de rega

Ao longo desta secção será, primeiramente, apresentada a escolha do *software* utilizado neste sistema, em seguida é descrito o seu funcionamento e por fim será explicado como interage com os restantes sistemas.

Antes de continuar é necessário deixar explícito que este é um protótipo funcional para testar este tipo de abordagem (internet das coisas) e não foi por isso uma prioridade a segurança.

4.1.1 Software escolhido

Das três opções consideradas, e já referidas no capítulo 3, optou-se pela criação de um *software* utilizando a linguagem *Ruby*. Foi escolhida a linguagem de programação *Ruby* pois esta: é *open source*; possui bibliotecas dedicadas à utilização de *web sockets*, *json* e *sqlite*; é uma linguagem simples, com um tempo de desenvolvimento curto e pode ser instalada em qualquer sistema operativo. Utilizando esta linguagem de programação é possível desenhar uma solução à medida das necessidades deste projeto. Como será explicado nos próximos parágrafos, esta unidade foi programada para tratar a informação proveniente dos módulos de uma forma mais cuidada, é possível ter em atenção os erros específicos de cada módulo, e criar uma resposta personalizada utilizando HTTP.

4.1.2 Funcionamento da unidade mestre

Sendo a camada mais elevada de SCADA a unidade mestre é responsável pelo controlo dos módulos (*slaves*) e pela interface com o utilizador. Tirando partido do funcionamento como servidor web a HMI é disponibilizada sob a forma de uma página HTML, desta forma a interface está disponível em qualquer lugar e é independente do dispositivo utilizado.

O funcionamento da unidade mestra, como representado no diagrama de figura 4.2, está dividido em dois processos paralelos:

Loop interno

Este processo é responsável pela manutenção da calendarização de rega, pelos cálculos da rega (caso necessários), pelo envio de avisos ao utilizador, pelo registo de erros e registo da utilização da MTU. Estas funções são desempenhadas por três métodos¹. O primeiro faz o registo de erros e utilização do servidor (função desempenhada pelo loop do servidor), recorrendo a um registo partilhado pelos dois processos este método escreve para o disco um relatório de erros e ações do loop do servidor. Os outros dois métodos só são executados a cada 30 segundos (por forma a tornar o processo menos exigente para o processador). O segundo método é responsável por verificar se os últimos valores recolhidos da temperatura e humidade ultrapassam os limites estabelecidos e se a bateria está muito "fraca", e caso isso se verifique, notificar o utilizador. O terceiro método é responsável por procurar na base de dados se algum terreno deve iniciar ou terminar um ciclo de rega. Dos três métodos que compõem o loop interno o segundo e o terceiro são os mais complexos e serão mais aprofundados uma vez que seja explicada a base de dados utilizada;

Loop do servidor

O segundo processo segue os princípios de funcionamento de um servidor web, espera que lhe seja feito um pedido para depois o processar e emitir uma resposta. Uma vez que o servidor não interpreta as páginas que serve (ao contrário do que acontece por exemplo com um servidor php) é utilizada uma lista de comandos pré-programados para conseguir ler/escrever na base de dados, iniciar a sessão de um utilizador ou responder a um módulo ativo no terreno. Desta forma sempre que é efetuado um pedido HTTP o ser-

¹Em *Ruby* dá-se o nome de *método* ao equivalente a *função* noutras linguagens de programação.

vidor testa-o face à lista de pedidos com caminhos conhecidos (a lista completa pode ser consultada na tabela A.1, em apêndice), se o caminho pedido existir este é executado, se não existir é servido o ficheiro para o qual o caminho aponta, ou é servida uma página de erro caso tal ficheiro não exista. Dentro da lista de caminhos destacam-se os pedidos "*espinho*", "*fields/valid*", "*fields/login*", "*fields/login/valid*", "*fields/login/check*", "*fields/*" e "*fields/logoff*" que servem para receber/tratar informação enviada pelos módulos, verificar se um módulo tem um terreno que existe, lançar a página de login, fazer o login a uma conta, verificar se o utilizador é válido, lançar a página principal da aplicação e terminar a sessão na aplicação, respetivamente. No final de cada pedido, uma vez servida a resposta, é escrito um resumo do pedido e ações tomadas no registo partilhado entre os dois loops.

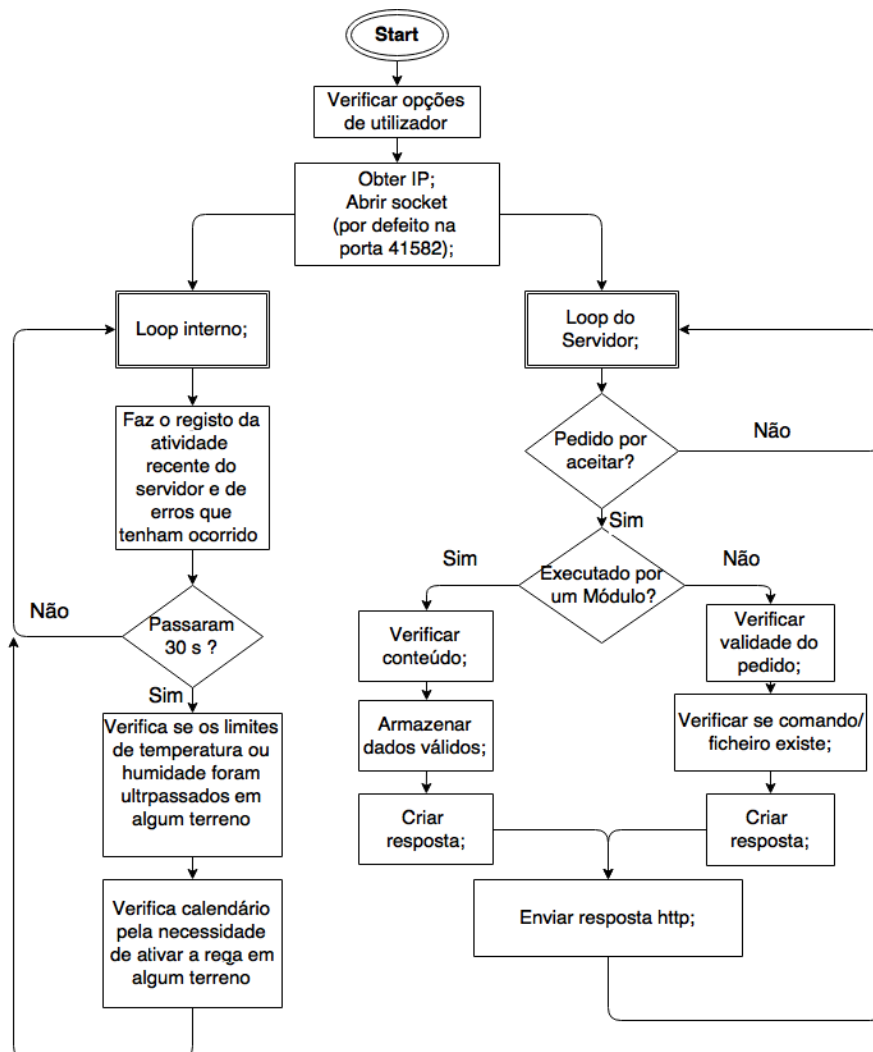


Figura 4.2: Diagrama de funcionamento do *software*.

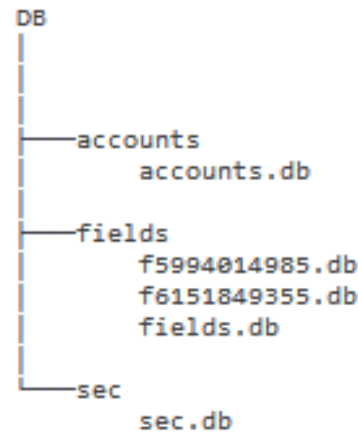


Figura 4.3: Diretório da base de dados.

Armazenamento de informação e ações

Nestes parágrafos é descrito o armazenamento de informação e ações (comandos que se pretende que os módulos sigam). A figura 4.3 apresenta uma representação esquemática do diretório que contém as bases de dados e que será utilizada como exemplo nesta secção para explicar a sua utilização.

A MTU armazena a informação proveniente dos módulos nos terrenos e as ações dos utilizadores em bases de dados. São utilizadas bases de dados para armazenar estes conteúdos por dois motivos principais: a organização destes conteúdos é delegada a uma aplicação muito eficiente; e os conteúdos são armazenados de uma forma não volátil, isto é, se a aplicação da unidade mestre falhar ou for reiniciada, esta informação não é perdida. A informação de sensores, atuadores e a sua calendarização do início e fim dos ciclos de rega ficando guardada numa base de dados deixa um histórico, este pode ser consultado, o que oferece ao utilizador uma forma de analisar o seu desempenho e ajustar os seus métodos de cultivo.

A MTU utiliza, no mínimo, três bases de dados e nelas armazena informação sobre as contas de utilizadores (*accounts.db*), palavras-passe (*sec.db*) e identificação dos terrenos (*fields.db*). Cria também uma nova base de dados (começada por *f* seguida de uma chave de identificação de dez dígitos e terminada em *.db*, por exemplo *f5994014985.db*) para cada novo terreno criado no sistema de modo a guardar os dados recolhidos para o mesmo. A base de dados *accounts.db* contém, para cada utilizador, uma chave composta por dez caracteres que o identifica nas restantes bases de dados. As chaves de identificação são geradas aleatoriamente e testadas contra colisões de cada vez que é necessário um novo identificador. Esta chave é utilizada para encontrar a palavra passe na base de dados *sec.db* e os terrenos de cada utilizador na base de dados *fields.db*. A base de dados *sec.db* só contém a correspondência entre a chave de utilizador e a palavra-passe que é arquivada sob a forma de um hash encriptado usando o método *bcrypt* [20]. As bases de dados *fields.db* e *f... .db* são as de maior interesse, pois estas armazenam a informação proveniente dos terrenos, bem como a informação a servir aos terrenos, ou seja, as ações aplicadas ao terreno.

Em *fields.db* toda a informação é armazenada numa tabela cujo esquema é

```
CREATE TABLE Fields(id text, ownerid text, name char(35), active integer,
```

```
watering integer , espwatering integer , times integer , timev integer ,
tthreshold integer , hthreshold integer , timethreshold integer ),
```

o que resulta na tabela 4.1, onde *id* são os dez dígitos de identificação do terreno, *ownerid* é a chave de identificação do utilizador dono do terreno, *name* é o nome do terreno, *active* indica se o terreno possui uma cultura ativa, *watering* representa um ação de ligar e desligar a rega, onde 1 indica ligar e 0 desligar, *espwatering* indica se a irrigação do terreno está ou não ativa (mais uma vez com 1/0 representando ligado/desligado), *times* e *timev* representam por quanto tempo, em segundos, os módulos sensores e atuadores devem hibernar entre comunicações, *tthreshold* é a temperatura máxima do ar à qual deve ser lançado um aviso e ligada a rega, *hthreshold* é o nível mínimo de humidade no solo a que deve ser lançado um aviso e ligada a rega, e por fim *timethreshold* guarda o valor de tempo (em segundos) para a rega se um valor limite for ultrapassado.

Tabela 4.1: Exemplo do conteúdo da base de dados Fields

id	ownerid	name	active	watering	espwatering	times	timev	tthreshold	hthreshold	timethreshold
5994014985	Fht3Vu77jB	FieldEx	1	0	0	1800	300	40	30	1200
6151849355	Fht3Vu77jB	banana	0	0	0	1800	300	40	30	1200

As bases de dados de cada terreno possuem cinco tabelas (cujo esquema pode ser consultado na tabela A.2, em anexo): *FieldInfo* onde são armazenados o nome da cultura, e a produtividade da mesma; *FieldData* é onde são armazenados os valores da temperatura do ar/solo, da humidade do ar/solo, nível de bateria, posição, erros, data e hora da comunicação de cada módulo sensor no terreno; *FieldValv* onde são armazenados os valores da rega, nível de bateria, posição, erros, data e hora da comunicação de cada módulo atuador no terreno; *FieldEsp* onde estão assinalados quais os módulos que estão ativos; *Schedule* onde é armazenada a calendarização da rega. A calendarização da rega é feita com cinco valores, a data, a hora, uma ação (mais uma vez 1/0, ligar/desligar), um número de identificação, este último é único para cada par de ações (ligar/desligar) e é utilizado para verificar se a ação já foi lida. No exemplo da tabela 4.2 estão armazenados os ciclos de rega 3 e 5. Neste exemplo, na data 10/12/2016 já houve um ciclo de irrigação entre as 0 horas e a 1 hora, mas ainda não começou o ciclo de irrigação entre as 2 horas e 30 minutos e as 3 horas e 30 minutos.

Tabela 4.2: Excerto de uma calendarização de rega.

id	date	time	action	checked
5	20161210	23000	1	0
5	20161210	33000	0	0
3	20161210	0	1	1
3	20161210	10000	0	1

Loop interno

É agora possível explicar como funciona o método que atualiza o estado da rega com base na calendarização e o método que verifica os limites de humidade, temperatura, bateria dos módulos e erros.

A cada trinta segundos a unidade mestre pede à base de dados de cada terreno todas

as ações (1/0) da tabela *Schedule*, cuja data é a do corrente dia, e a hora é a atual arredondada ao minuto mais próximo. Na base de dados são arredondadas ao minuto mais próximo os horários de rega o que torna mais simples de controlar os horários de rega, na interface homem máquina são tomadas as devidas precauções para acertar estes horários com o minuto mais próximo. A ação recebida da base de dados é testada face à última ação (que foi guardada em memória). Caso exista uma ação e seja diferente da anterior é alterado o valor *watering* desse terreno na tabela *Fields*, na base de dados *Fields.db* (ver figura 4.4). Uma vez alterado o valor *watering* na próxima comunicação entre o módulo e a MTU será indicado ao módulo que comece um ciclo de rega.

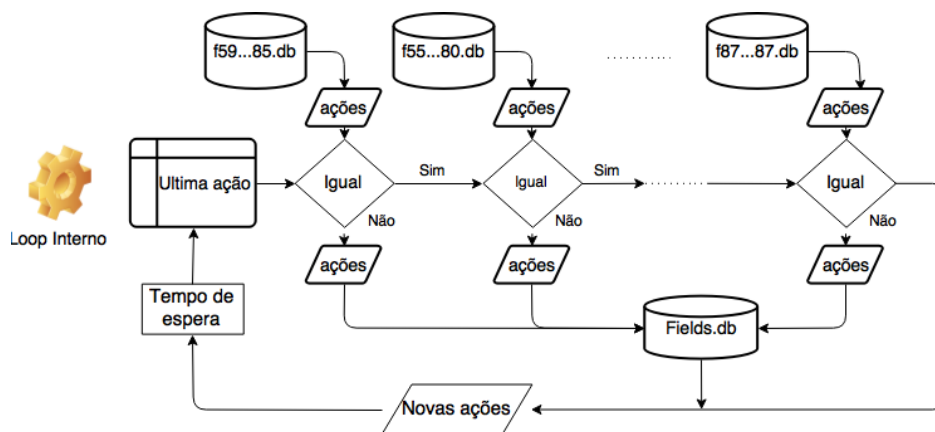


Figura 4.4: Método de atualização da calendarização do loop interno.

A verificação dos limites é efetuado de maneira semelhante, quando é pedido o horário de rega é também pedido à base de dados a última informação de cada sensor e estes valores são comparados com os limites desejados. Se um limite foi ultrapassado é enviada uma mensagem ao utilizador através de um email. Os valores limite testados são:

- Bateria do módulo - o nível de bateria do módulo é obtido a partir da medição do potencial nos seus terminais. Um aviso de bateria fraca é lançado quando é registada uma medição com um valor inferior a 11.9 V;
- Temperatura do ar - a temperatura do ar é comparada à temperatura máxima definida pelo utilizador e a temperatura de 3 graus centígrados. Se a temperatura for superior à temperatura definida pelo utilizador, a cultura pode estar a sofrer de excesso de calor, se a temperatura for inferior pode haver formação de geadas que danifiquem as culturas;
- Humidade do solo - é comparada com o valor definido pelo utilizador. Se a humidade do solo for inferior à desejada, o solo pode estar muito seco, o que pode danificar a cultura;
- Existência de erros num módulo - se um módulo possuir erros esta informação também é fornecida ao utilizador.

Envio de avisos

Durante o funcionamento do sistema podem, por vezes surgir situações inesperadas no terreno, ou num módulo. Para o envio de avisos para o utilizador optou-se pela utilização de um serviço de email. O serviço de email utilizado combina uma biblioteca de *Ruby* chamada *Mail* [32] e uma conta de email do serviço *Gmail*. É utilizado o protocolo *Simple Mail Transfer Protocol* (SMTP) na porta 578 para comunicar o envio de emails ao serviço fornecido pela *Google*. Para este serviço foi criada a conta *0aaserver@gmail.com* a partir da qual são enviados os emails com avisos.

Os avisos poder ser de dois tipos:

- Aviso de início de sessão - ocorre sempre que é iniciada a sessão. O cabeçalho e corpo da mensagem são "AAlogin" e "Your session has started. It will end in 10 hours. If you didn't start it send a response to this e-mail.";
- Avisos relativos aos módulos - estes foram referidos na secção anterior e no email tomam, por exemplo, a seguinte forma:

```
espap08
  Battery low : 11.4 [V]
  Air temperature high : 45.0 [°C]
  Air temperature low : 2.3 [°C]
  Soil humidity low : 20 [%]
  Errors : [5]
           [5] - Field - bad name
  Last communication at: 2017-01-18 00:47:48 +0000
```

e com o cabeçalho "Warning in field: <nome do terreno>".

No exemplo anterior estão representados todos os parâmetros vigiados, no entanto basta um dos limites ser ultrapassado para ser enviado o aviso, nesse caso os outros parâmetros não são enviados no email. Para além disso, num só email são enviados todos os módulos com erros, ou limites ultrapassados. Um exemplo das situações referidas é:

```
espap08
  Air temperature low : 2.0 [°C]
  Soil humidity low : 40 [%]
  Errors : [5]
           [5] - Field - bad name
  Last communication at: 2017-01-18 00:47:48 +0000
espap12
  Battery low : 11.4 [V]
  Air temperature low : 2.3 [°C]
  Last communication at: 2017-01-18 00:34:40 +0000
```

Os emails, caso os avisos ativos não se alterem, são enviados a cada seis horas. Caso apareça um aviso novo um email é enviado após cinco minutos, desta forma evitando que sejam enviados emails constantemente, mas mantendo o utilizador atualizado frequentemente. Se não existirem avisos não são enviados emails.

Gestão dos terrenos irrigados

Antes de ser explicado como a unidade mestre do sistema de monitorização e controlo de rega interage com os módulos e com o utilizador é necessário explicar como flui e como é tratada a informação. A MTU só recebe informação por duas vias: ou um módulo comunica uma informação, ou um utilizador atualiza uma informação através da interface online. Em ambos os casos é usado um query no URL do pedido para transmitir a informação. A estrutura do URL para transmissão de informação para o servidor é "http://<host>:<port>/<path>?<searchpart>" [33], onde <host> é o endereço de IP do servidor (pois não foi registado um domínio para o mesmo), <port> é 41582 por defeito, <path> é um dos caminhos conhecidos (ver tabela A.1, em apêndice) e <searchparte> é uma string de query composta por pares de chaves e correspondentes valores. Um exemplo de comunicação entre um módulo e o servidor pode conter o caminho "*fields/valid*" e o query "field=<nome do terreno>& owner=<nome do utilizador>& esp=<nome do módulo>", isto acontece sempre que um módulo é posicionado e configurado num terreno. Ao receber este pedido o servidor verifica se <nome do utilizador> é um utilizador no sistema e se o terreno existe para este utilizador, caso ambos sejam verdade o servidor altera o estado do módulo <nome do módulo> para ativo na respetiva base de dados e responde com um "ok", se por outro lado alguma das informações não estiver correta o servidor apenas responderá com "notok". Quando o servidor recebe pedidos contendo um caminho conhecido testa sempre os conteúdos do pedido em busca da identificação de um utilizador e caso esta identificação exista verifica se pertence a um utilizador com sessão iniciada, caso isto não se verifique o pedido será negado a fim de proteger as bases de dados e informações que pertençam a utilizadores específicos.

Sessões no servidor

O servidor possui a capacidade de iniciar uma sessão para cada utilizador que esteja registado no sistema. Para iniciar sessão é feito um pedido com o caminho "*fields/login/check*" e o query "c1=<palavra-passe>& c2=<fingerprint>& c3=<nome do utilizador>& c4=<webId>". Com o pedido de início de sessão o servidor necessita de cinco informações sobre o utilizador:

- <palavra-passe> e <nome do utilizador> - São testados face à informação das bases de dados *accounts.db* e *sec.db*;
- <fingerprint>² - É uma chave numérica que permite a identificação do *browser* que efetuou o pedido [34], esta chave é usada como redundância na identificação dos utilizadores;
- <webId> - É uma chave que é gerada para cada sessão, esta chave é guardada num cookie na duração da sessão, e é constituída por 50 caracteres aleatoriamente escolhidos de uma lista de 69 (ver tabela A.3, em apêndice, onde estão listados os caracteres usados), nesta configuração existem 69^{50} (ou $8.76 * 10^{91}$) combinações possíveis o que torna quase impossível que haja uma colisão entre chaves;

²Esta técnica foi apresentada numa pesquisa pela Electronic Frontier Foundation e permite a identificação anónima de um *browser* com uma precisão que pode chegar aos 94%.

- IP - Por fim é também armazenado o endereço de IP de onde foi feito o pedido.

Uma vez que o servidor aceite o início de sessão os dados do utilizador são guardados numa tabela de dispersão em memória contendo: webId; chave do utilizador; IP; fingerprint; nome do utilizador; e timeout que é a hora a que a sessão deve acabar. A lista de sessões tem o seguinte formato "webId => [chave do utilizador, IP, fingerprint, timeout, nome do utilizador]"(onde webId é a chave) e é armazenada em memória com todos os outros utilizadores ativos para consulta rápida. Uma vez iniciada a sessão todos os pedidos enviados pelo *browser* contêm o webId, que é enviado automaticamente sob a forma de um cookie, e a chave fingerprint que é enviada como um query. Desta forma o servidor garante a legitimidade de cada pedido. Uma vez que seja atingida a hora de timeout é apagada a sessão.

Potenciais problemas e particularidades

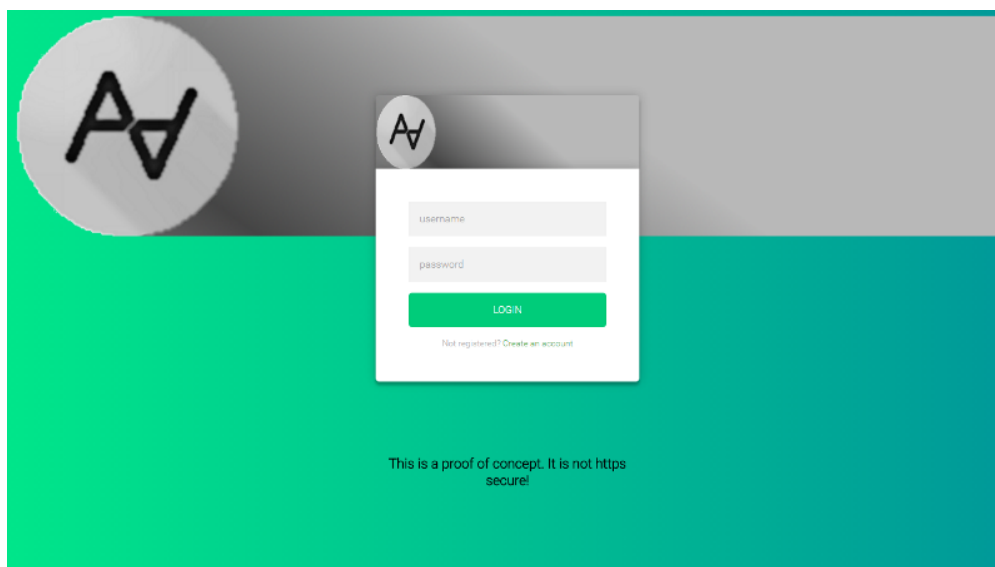
A unidade mestre pode conter problemas que provêm de algumas particularidades deste projeto. Um exemplo destas particularidades é a não implementação do protocolo HTTPS. Os microcontroladores utilizados não suportam HTTPS, por isso este protocolo não pode ser utilizado. Utilizar HTTP acaba, por sua vez, por implicar com a interface e com a segurança, uma vez que na interface é usada a API *Google Maps* que contém serviços que só suportam servidores seguros (sobre HTTPS), e porque as palavras-passe e outras informações trocadas entre o servidor e o utilizador são enviadas em texto não encriptado. Outros problemas podem surgir da utilização deste *software* num sistema operativo que não seja *Microsoft Windows*, ou um elevado número de utilizadores simultaneamente online, pois estes cenários não foram testados.

4.1.3 Interface homem máquina

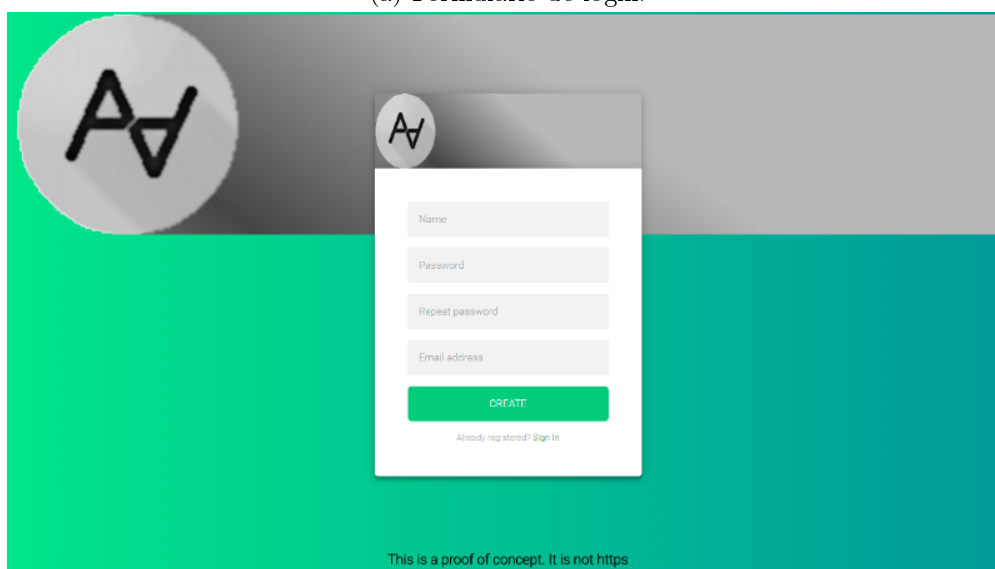
A interface homem máquina é composta por duas páginas HTML que são servidas pelo servidor do sistema de monitorização e controlo de rega. O conjunto destas páginas, a página de login e a página principal, constitui a interface homem máquina (HMI).

Página de login

A página de login (ver figura 4.5) contém dois formulários, um para efetuar o login e outro para criar uma conta. A função desta página é garantir que a página principal só é acedida por utilizadores com sessão iniciada. Para aceder à página de login deve ser efetuado um pedido com o caminho "*fields/login*". Ao carregar esta página um de dois desfechos pode acontecer, a página pode aperceber-se que uma sessão já está iniciada e automaticamente carrega a página principal, ou não existe nenhuma sessão iniciada e então é carregada a página de login. Por defeito a página apresenta o formulário de login quando é carregada, para trocar para o formulário de criar conta é necessário clicar na hiperligação "Create an account" situada por baixo do botão "Login". Para voltar ao primeiro formulário clica-se na hiperligação "Sing in" situada por baixo do botão "Create".



(a) Formulário de login.



(b) Formulário para criar conta.

Figura 4.5: Página de login.

Página principal

A página principal (ver figura A.1, em apêndice) é onde o utilizador interage com o sistema de monitorização e controlo de rega. Nesta página é possível verificar o estado dos módulos no terreno, programar horários de rega, ver os níveis de humidade e temperatura entre outras opções que serão discutidas em seguida. Esta página contém cinco zonas distintas que a seguir se apresentam.

Barra de título

Situada no canto superior esquerdo, ocupa 70% do ecrã na horizontal (ver figura 4.6).

Contém uma imagem e o título da interface.

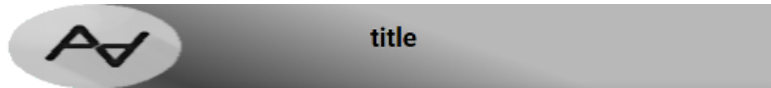


Figura 4.6: Barra de título.

Barra de identificação e logout

Situada no canto superior direito, ocupa 30% do ecrã na horizontal (ver figura 4.7). Contém a identificação do utilizador e o botão de logout que permite sair em segurança da página.

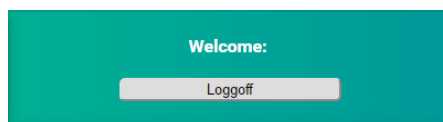


Figura 4.7: Barra de logout.

Zona central esquerda

Situada no centro esquerdo, ocupa 70% do ecrã na horizontal. Contém uma janela com um mapa onde são representados os módulos na sua posição geográfica (figura 4.8) e uma janela de calendarização da rega (figura 4.9).

Na janela do mapa, que é gerado pela *API Google Maps* [35], é possível verificar o estado da operação de cada módulo, representado pela sua cor e é possível ver os seus dados internos, como demonstrado na figura 4.8 (no módulo *espap12*). Nesta janela existe também uma legenda que clarifica o significado das cores dos marcadores no mapa e um botão (botão "Refresh") que permite recarregar a informação do mapa.

Na janela da calendarização de rega, gerada com recurso à biblioteca *vis.js* [36][37], é possível gerir os horários de rega. Assim como acontece com o mapa, quando um terreno de cultivo é selecionado, a informação referente a esse terreno é automaticamente carregada. No caso do mapa é apenas carregada a informação mais recente, no entanto, na calendarização, é necessário mostrar mais do que a rega atual. Uma vez carregado um terreno de cultivo a janela de calendarização mostrará todos os horários de rega dos próximos 360 dias (aproximadamente um ano). O utilizador pode a qualquer altura adicionar um período de rega ou editar a hora de início - fim³ ou eliminar um período já existente. Criar e editar o horário de rega é extremamente simples. Com um duplo clique na linha temporal é gerado um período (ou bloco) de rega de uma hora com início na hora do clique, e tanto este bloco como os já existentes podem ser selecionados (passando neste caso a ser mostrados a amarelo). Um bloco selecionado pode: ser movido, mantendo o cursor premido no centro do bloco, o tempo de rega mantém-se igual, mas não o início e o fim; ser estendido, arrastando uma das pontas do bloco, altera-se a data arrastada e consequentemente o tempo de rega; ser apagado, clicando na cruz vermelha

³Será utilizada a notação início - fim para definir um período (bloco) de rega, note-se que "início" e "fim" são substituídos por horas e minutos, por exemplo 12h:45min - 16h:01min.

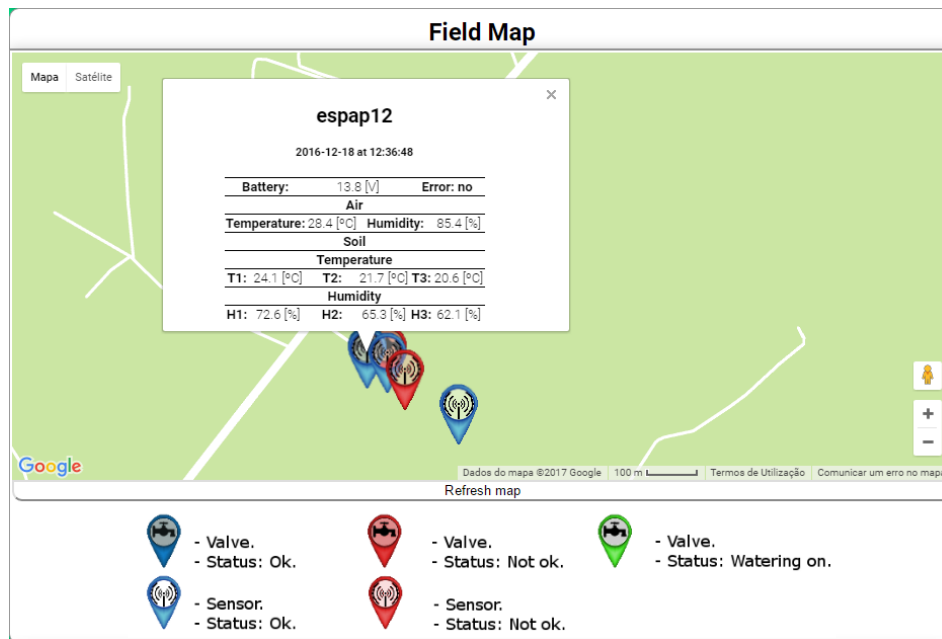


Figura 4.8: Janela do mapa.

no canto superior direito do bloco, este será apagado do sistema. É de notar que estas alterações só tomarão efeito na base de dados da MTU uma vez premido o botão "Save Changes", pois só depois desta operação são comunicadas à MTU as alterações (todas as alterações efetuadas na calendarização serão perdidas se a página for recarregada antes de ser premido o botão). Na imagem 4.9 é possível observar a diferença entre um bloco editado, um bloco selecionado e um bloco não editado (representados por esta ordem da esquerda para a direita). Os blocos carregados não mostram a data de início - fim no seu interior, no entanto se forem editados mostrá-las-ão até serem recarregados, desta forma o utilizador tem maior controlo sobre os blocos editados.

Na calendarização existem duas particularidades: se algum bloco for arrastado para uma hora anterior à hora atual, a sua hora de início é automaticamente colocada quinze minutos depois da hora atual, por exemplo, se a hora atual for 15h:00min e a hora de início de um bloco for colocada nas 14h:00min a hora de início será automaticamente atualizada para as 15h:15min; a segunda prende-se com blocos sobrepostos, caso exista um bloco que contenha outro, por exemplo se o bloco "A" 15h:00min - 18h:00min e o "B" 14h:00min - 17h:00min, então a rega começará as 15h:00 e terminará às 17h:00min, pois é sempre respeitada a ordem que aconteça primeiro, independentemente dos pares início - fim dos blocos.

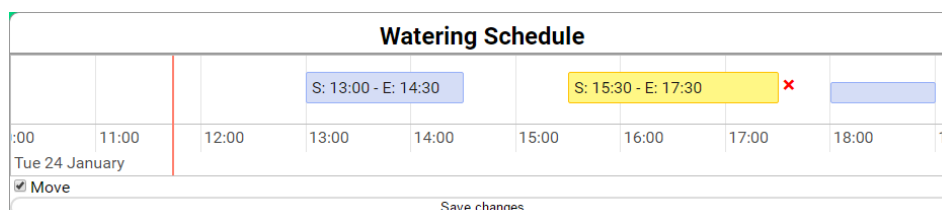


Figura 4.9: Janela de calendarização da rega.

Zona de opções

Situada no centro direito, ocupa 30% do ecrã na horizontal. Contém as secções que permitem escolher um terreno para ser carregado para a aplicação, alterar as opções do terreno e criar novos terrenos.

A secção de escolha do terreno, figura 4.10, é onde o utilizador pode escolher que terreno quer carregar. Ao carregar a página, a lista de todos os terrenos do utilizador também é carregada. Uma vez clicado o nome do terreno a aplicação pedirá à unidade mestre a informação que lhe corresponde.

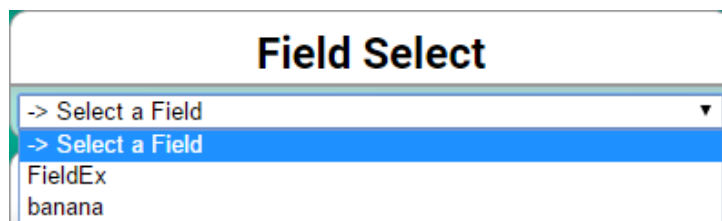


Figura 4.10: Secção de escolha de terreno.

A secção de escolha de opções contém dois menus. O primeiro menu (ver figura 4.11) aparece quando o terreno selecionado não tem nenhuma cultura ativa. Neste menu o utilizador pode escolher o nome que quer dar a uma cultura e, carregando no botão "Open Campaign", iniciá-la no sistema.

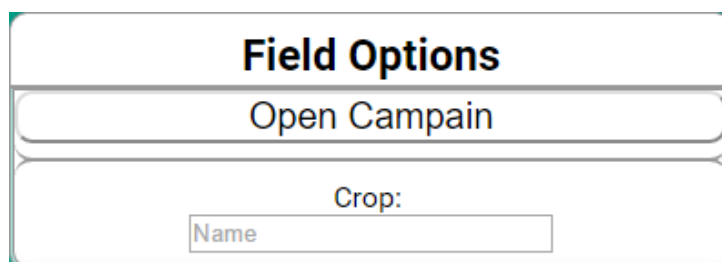


Figura 4.11: Secção de opções do terreno, primeiro menu.

Uma vez que o terreno tenha uma cultura ativa aparece o segundo menu, que como se pode observar na figura 4.12 contém várias informações e opções.

Começando do topo da figura 4.12 este menu contém:

- Botão "Close Campaign" - que como indica termina a cultura no sistema;
- Produção - este valor refere-se à quantidade produzida no fim da campanha e tem que ser preenchido para que a cultura possa ser terminada no sistema;
- Cultura - que contém o nome da cultura;
- Indicação de rega - pode dizer "Yes" se a irrigação estiver ligada ou "No" se não estiver;
- Botão "Change" - este botão permite atuar as válvulas remotamente e independentemente do horário de rega, pode dizer "Change: on" se a irrigação estiver desligada ou "Change: off" se estiver ligada;

Field Options

Close Campain

Production:
[] [ton]

Crop:
testCrop o1222 aa

Watering:
No
Change: On

Actuation log time:
5 [min]
New: [] [min]
Change

Sensor log time:
30 [min]
New: [] [min]
Change

Air temperature threshold:
40 [°C]
New: [] [°C]
Change

Soil humidity threshold:
30 [%]
New: [] [%]
Change

Watering threshold time:
1200
New: [] [min]
Change

Actuation modules:
espap05, espap15

Sensor modules:
espap04, espap08, espap12, espap34

Refresh

Figura 4.12: Secção de opções do terreno, segundo menu.

- Tempo de comunicação dos módulos atuadores - indica de quanto em quanto tempo os módulos devem comunicar com o sistema. Este valor pode ser alterado escrevendo um novo valor na linha seguinte e clicando no botão "Change" (o tempo mínimo permitido é 3 minutos);
- Tempo de comunicação dos módulos sensores - é equivalente ao item anterior, mas aplica-se aos módulos sensores;
- Limite máximo de temperatura - indica qual a temperatura máxima à qual é enviado um aviso ao utilizador e à qual é iniciada a rega automática;
- Limite mínimo de humidade - é equivalente ao item anterior mas aplica-se ao nível

de humidade do solo;

- Tempo de rega automático - indica quanto tempo deve durar a rega automática caso seja ultrapassado um dos limites anteriormente definidos;
- Lista de módulos atuadores e sensores - são duas listas que contém os módulos ativos no terreno, quando clicado o nome de um módulo o mapa é focado nesse módulo e a sua informação é mostrada no balão de informação (tal como na figura 4.8);
- Botão "Refresh" - este botão recarrega a informação desta secção.

A última secção desta zona é destinada à criação de novos terrenos no sistema (figura 4.13). A criação de terreno é composta apenas por uma caixa de texto e um botão ("Create Field"). Uma vez criado um terreno no sistema este já não pode ser apagado, desta forma é salvaguardada qualquer informação para uso futuro.

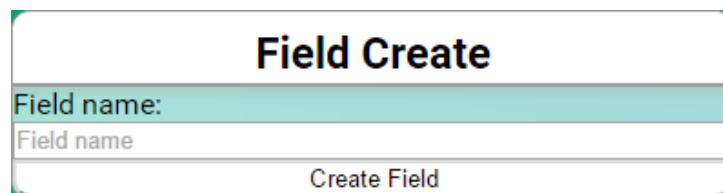


Figura 4.13: Secção de criação de terreno.

Zona de gráficos

A zona de gráficos é a última zona e ocupa todo o fundo da página, é composta por duas janelas com gráficos como mostra a figura 4.14. Os gráficos mostram informação obtida pelos módulos sensores no terreno. O primeiro gráfico representa a temperatura e humidade do ar registada por cada um dos módulos e o segundo gráfico representa a temperatura e humidade médias do solo. Ambas as janelas têm a mesma composição: no topo, o título indica de que gráfico se trata; imediatamente abaixo do título está a legenda, que para além de identificar a que módulo pertence cada curva também permite desativar e ativar a sua visualização na área gráfica; de seguida encontra-se a área gráfica, esta é composta por três eixos: à esquerda está o eixo da temperatura em graus centígrados ($^{\circ}\text{C}$) e está associado a linhas vermelhas; à direita está o eixo da humidade em percentagem (%), que está associado às linhas azuis; por fim o eixo das abcissas que mostra o registo de data e hora; nas três linhas seguintes estão a indicação de início e fim dos dados representados no gráficos, um seletor que permite ajustar o intervalo de tempo representado no gráfico e o botão "Refresh" que atualiza o gráfico de acordo com a seleção anteriormente referida; na última linha estão dois botões ("Download CSV" e "Save as PNG") e uma checkbox. Ao clicar no botão "Download CSV", se a checkbox não estiver selecionada, o utilizador faz o download de um ficheiro csv contendo os dados representados no gráfico, se a checkbox estiver selecionada o ficheiro csv conterá todos os dados referentes ao terreno. Ao clicar no botão "Save as PNG" o utilizador faz o download de uma imagem da área gráfica.

Olhando para os gráficos, em particular o primeiro gráfico da figura 4.14, é possível observar que são apresentados valores hora a hora, este padrão é gerado artificialmente

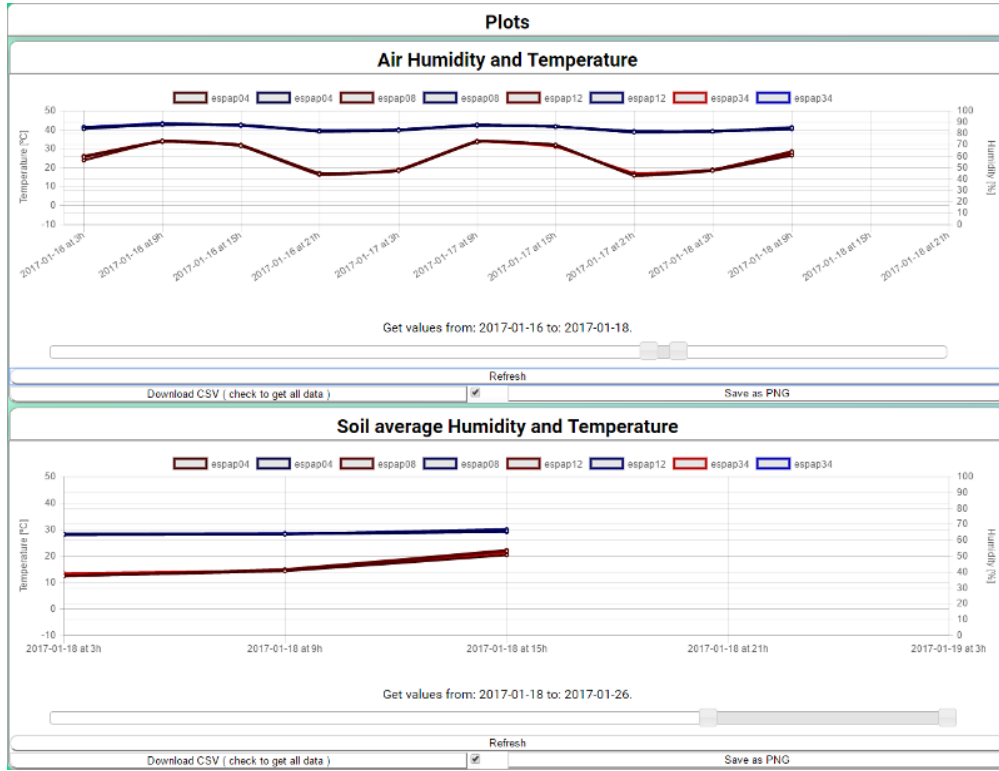


Figura 4.14: Zona de gráficos.

pelo servidor da MTU para tornar a representação gráfica mais legível, uma vez que em funcionamento, cada um dos módulos acorda com um determinado desfasamento de cada um dos outros. Se fossem representados os valores como são guardados na base de dados, o gráfico tornar-se-ia extremamente complicado de representar e de ler. Para contornar esse problema os gráficos da página principal mostram a média dos valores reais a cada hora segundo o algoritmo:

1. **Criar** array⁴ *Resultados*;
2. **Criar** número de horas $numHoras = (dataFim - dataInicio) * 24$;
3. **Para cada** módulo ativo m ;
4. **Para cada** hora i de 0 até $numHoras$;
5. **Retirar** da base de dados valor de temperatura desde hora i até $i+1$;
6. **Se** não existirem valores nessa hora;
7. Adicionar o valor *null* a *Resultados*;
8. **Se** existirem valores;
9. Adicionar média destes valores a *Resultados*;

⁴Em *Ruby* os arrays podem conter qualquer outro objeto e crescer dinamicamente, por isso este não tem variáveis nem dimensão definidas.

10. Fim de **Se** da linha 6;
11. Fim de **Para cada** da linha 4;
12. Fim de **Para cada** da linha 3.

Desta forma os valores obtidos no array *Resutados* são a média dos valores de cada hora, e caso não existam valores nessa hora a sua representação é ignorada.

Este algoritmo é utilizado para a temperatura e humidade do ar e do solo. Quando são representados os valores do solo é não só efetuada a média dos valores de cada sensor, mas também é feita a média entre sensores. No entanto, o valor de cada sensor continua a ser disponibilizado na folha de excel que é disponibilizada pela interface.

4.1.4 Interface com os módulos

O controlo dos *slaves* é igualmente efetuado com recurso ao protocolo HTTP e acontece automaticamente entre a unidade mestre e os módulos. Tradicionalmente esta não é uma boa solução para uma aplicação industrial, pois não é possível garantir a comunicação em tempo real, no entanto existem algumas particularidades que tornam este meio de comunicação viável neste caso: em primeiro lugar, a ligação à internet é, hoje em dia, geralmente rápida, mesmo utilizando dados móveis; em segundo lugar, a comunicação utilizada não necessita de ser estritamente em tempo real, e tempos de resposta até cinco minutos são aceitáveis; e por último os μ C utilizados comunicam através de HTTP nativamente. A comunicação com os módulos sensores e atuadores é bastante simples, tal como representado na figuras 4.15, ao "acordar" o sensor liga-se à rede Wi-Fi do terreno, lê os valores de temperatura e humidade das suas sondas e formula um pedido que envia ao servidor da unidade mestre, e esta analisa o pedido e responde em conformidade. Este *software*, como já foi referido, foi pensado especialmente para a função que cumpre e por isso espera pelas mensagens dos *slaves* e está programado para as processar.

A mensagem dos módulos tem a seguinte estrutura: "GET /espinfo?field=<nome do terreno>& type=<tipo de módulo>& name=<nome do Módulo>& bat=<Potencial da bateria do módulo>& <etc...>& error=<erro> HTTP/1.1", onde <etc...> é informação variável que depende do tipo de módulo. No caso de um sensor <etc...> contém os valores de temperatura e humidade do ar e do solo, no caso dos atuadores contém o estado da rega, "on/off" e possivelmente outras informações sobre pressão ou caudal.

Ao receber este pedido o sistema de monitorização e controlo de rega verifica se a data está bem estruturada, se a data está correta e verifica se a mensagem contém outros erros. Em seguida a MTU armazena os dados recebidos na base de dados (se estes forem válidos) e constrói uma mensagem de resposta. A resposta da MTU, "Próxima ação do sensor", está dividida em cabeçalho e corpo. O cabeçalho contém apenas a identificação da unidade mestre. O corpo da mensagem contém duas variantes: caso seja um comando para dormir (que é aplicável a ambos os módulos), a mensagem tem a seguinte estrutura: "<cabeçalho>\r\n\r\n t: <tempo> \r<erro>", onde <tempo> indica quanto tempo o módulo deve dormir (tempo de hibernação, em segundos), e <erro> diferente de 0 indica que houve um erro na mensagem; o segundo tipo de mensagem destina-se apenas aos atuadores, tem o formato "<cabeçalho> \r\n\r\n v: <estado> \r <erro>", onde <estado> pode ser igual a "on" ou "off", indicando se a válvula de rega deve ser aberta ou fechada, respetivamente. Durante os períodos de rega os módulos atuadores mantêm-se

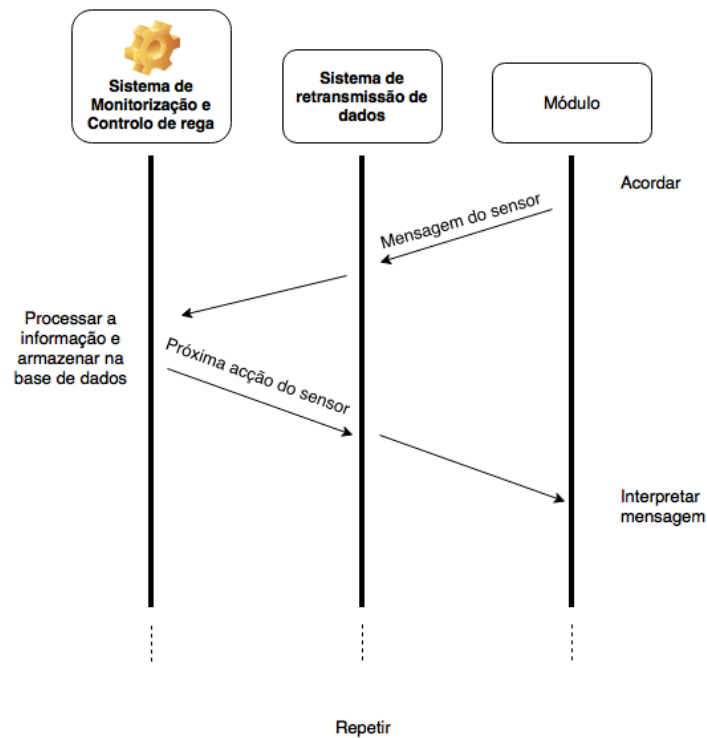


Figura 4.15: Esquema de comunicação entre a unidade mestre do sistema de monitorização e controlo de rega e um módulo genérico.

ligados para mais rapidamente responderem a um pedido de fim de rega.

4.2 Sistema de retransmissão de dados

O sistema de retransmissão de dados começou por ser um terceiro tipo de módulo. Este módulo seria responsável por coletar a informação de todos os outros e enviar para a unidade mestre um pacote de dados com toda a informação gerada pelo campo onde se inseria. Esta primeira abordagem (cujo esboço é apresentado na figura 4.16) funcionaria com base num *nodeMCU* e um *modem* GSM como periférico. O *nodeMCU* lançaria uma rede Wi-Fi com a qual se ligariam todos os outros módulos, num *buffer* interno registaria todas as mensagens e periodicamente enviá-las-ia para a MTU. Como resposta receberia as instruções que teria de reencaminhar para cada módulo. Para além da complexidade envolvida na conceção de um algoritmo para executar esta tarefa, seria também necessária a criação de um esquema elétrico e respetivo circuito. A complexidade envolvida neste processo invalidou esta solução.

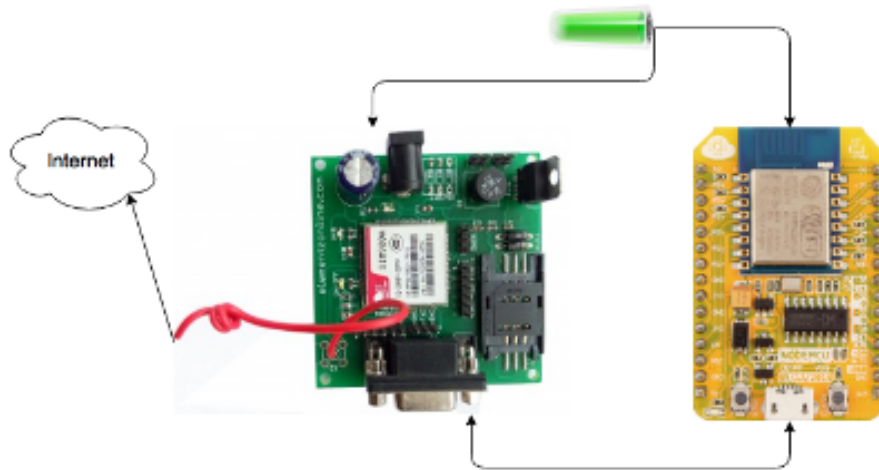


Figura 4.16: Primeiro esboço do sistema de retransmissão de dados.

A alternativa, como já referido no capítulo 3, surgiu na utilização de um *smartphone* para gerar uma rede Wi-Fi ligada à internet utilizando um serviço de dados móveis. O modelo utilizado neste estudo foi o *Vodafone Smart 6* (figura 4.17⁵).

Este modelo possui, para além do hardware standard, uma bateria de 1400mAh, que não armazena energia suficiente para um dia de funcionamento como *access point*. A sua utilização depende de um circuito simples que carrega a sua bateria (esquema elétrico - figura 4.18), a partir da bateria de um dos módulos no terreno, que passará a funcionar como antena principal.

A escolha deste tipo de aparelho foi a opção utilizada para o protótipo do projeto, pois apresenta vantagens, tais como:

- não necessita de ser programado;
- possibilita a gestão da rede, mostra quais os dispositivos ligados;
- permite a ligação à internet;

⁵Retirado de http://www.telefonguru.hu/images/big/Vodafone_Smart_first_6.jpg, adaptado.



Figura 4.17: *Vodafone Smart 6* utilizado.

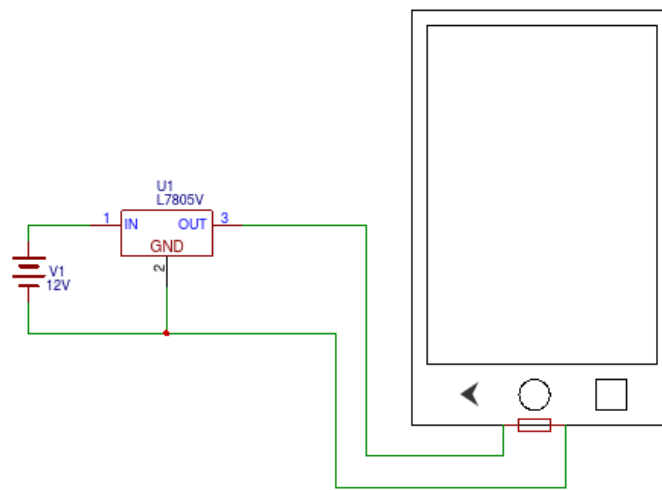


Figura 4.18: Esquema de carga do *smartphone*.

- contém um *browser* que permite testar a interface num dispositivo móvel;
- tem bateria com proteção de carga incorporada;
- tem dimensão reduzida, o que facilita a sua instalação na caixa (blindagem) utilizada.

Mas também existem desvantagens nesta abordagem. Uma vez que um *smartphone* utiliza um sistema operativo complexo e hardware que não é utilizado, torna-se um elemento desnecessariamente caro e que consome demasiada energia para ser utilizado num produto final. É por isso necessário reiterar que esta não é a solução ideal para um produto final, mas sim a solução utilizada para testar o sistema. Como solução final deve ser utilizado um *router* comercial.

4.3 Módulos

Como já foi referido ao longo deste documento, existem dois tipos de módulos, atuadores e sensores. Ambos funcionam como RTU no sistema e embora desempenhem

funções diferentes, têm bastante em comum uma vez que a sua arquitetura é centrada no *NodeMCU* alimentado por uma bateria de doze volts e um painel solar. A operação geral dos módulos também é semelhante, ambos podem funcionar de modo manual ou automático, e no modo automático seguem o ciclo:

1. acordar;
2. ler sensores;
3. comunicar com a MTU;
4. obedecer à resposta;
5. adormecer;
6. repetir.

De acordo com a lista de objetivos apresentada no capítulo 3.1 os módulos atuadores são responsáveis por adquirir caudal/pressão e atuar as válvulas de rega, e os módulos sensores são responsáveis por adquirir a temperatura e humidade do solo e do ar.

Nesta secção é explorado o hardware utilizado, como é que o software faz a interação entre os componentes, como é suposto os módulos funcionarem, qual a interação entre estes e o utilizador do sistema e como se torna viável a utilização de baterias.

4.3.1 Hardware

Segue-se aqui a descrição do material utilizado nos módulos. Serão primeiramente apresentados os componentes comuns aos dois tipos de módulos antes de serem explicados os elementos particulares de cada um.

Os componentes comuns aos atuadores e sensores são:

- blindagem;
- painel solar;
- bateria;
- controlador de carga;
- *nodeMCU*;
- circuito de proteção.

Blindagem

A blindagem é muito simples. Uma mala de ferramentas permite acomodar todos os componentes e protege-los do ambiente exterior, sem tornar um entrave ao seu manuseamento. A mala escolhida (na figura 4.19) tem 1.3kg e as suas dimensões internas são 320mm x 220mm x 100mm, volume necessário para a placa eletrónica, bateria e controlador de carga.



(a) Fechada.



(b) Aberta.

Figura 4.19: Blindagem dos módulos.

Painel solar

Foi escolhido um painel solar com uma potência de 5 watts (W)(ver figura 4.20). Este painel tem as dimensões 270mm x 185mm x 18mm, 0.71kg, atinge 18.10V e 0.28A de potência de pico (com o valor de insolação de $1000W/m^2$, a 25 graus centígrados e massa de ar (AM) de 1.5). O fornecedor não disponibiliza o rendimento do painel, mas este pode ser estimado a partir dos dados conhecidos (equação 4.1). Sabendo a área A , a potência de insolação P_s e a potência de pico P_p tem-se

$$A = 0.270 * 0.185 \approx 0.050m^2 \quad \eta \approx \frac{P_p}{P_s * A} = \frac{5}{1000 * 0.05} = 0.1 = 10\% \quad (4.1)$$

Sabendo qual o seu rendimento pode-se estimar qual a produção energética mínima e máxima que se espera conseguir ao longo de um ano. Estes valores serão posteriormente comparados com as necessidades energéticas dos módulos para verificar se o painel se adequa ao sistema.

Com a insolação média no inverno a radiação solar atinge $150 kWh/m^2 * ms$ [38]. A partir deste valor é possível calcular qual a energia disponível, em média, nos dias de inverno. É necessário ter em conta que estes valores não foram corrigidos para a temperatura de inverno que pode diminuir o rendimento obtido anteriormente (equação 4.1) e que se assume uma inclinação (azimute) perfeita para a exposição solar em cada momento. Na equação 4.2 é calculada a energia diária da radiação solar e a produção energética diária do painel solar.

$$\begin{aligned} E_{sd} &= E_{sm} * 1000/30 \Leftrightarrow \\ E_{sd} &= 150/30 = 5000Wh/m^2 * dia \\ E_{pd} &= \eta * E_{sd} * A \Leftrightarrow \\ E_{pd} &= 0.1 * 5000 * 0.05 = 24.98Wh/dia \end{aligned} \quad (4.2)$$

E_{sm} é a energia média mensal, E_{sd} é a energia média diária e E_{pd} é a energia média produzida pelo painel solar. Uma vez que o painel opera com uma voltagem nominal de 12V é possível estimar a quantidade de carga elétrica gerada por dia (equação 4.3).

$$C = \frac{E_{pd}}{\Delta V} \Leftrightarrow$$

$$C = \frac{24.98}{12} = 2.081 Ah/dia \quad (4.3)$$

Assim o painel solar produzirá, no inverno, uma média de 2.081 Ah, por dia.



Figura 4.20: Painel solar utilizado.

Bateria

A bateria utilizada (figura 4.21), é uma bateria selada com uma voltagem nominal de 12V. Esta bateria tem as dimensões 151mm x 65mm x 100mm, tem 2kg e capacidade de 8mAh [39].



Figura 4.21: Bateria utilizada.

A bateria utilizada não necessita de manutenção, pode ser rodada no espaço sem verter ácido, está pronta para ciclos profundos de carga e descarga e pode ser recarregada por um painel solar. O velcro, que se pode observar na imagem, é o mecanismo de fixação da bateria à blindagem.

Como alternativa à bateria utilizada foi testado um *power bank* (ver figura 4.22), que possui uma voltagem nominal de 5V, uma capacidade de 7800mAh, mede 90mm x 60mm

x 20mm e tem 0.15kg. Em todos os aspetos até este ponto apresentados, a utilização do *power bank* seria uma solução melhor do que a utilizada. No entanto, o *power bank* não foi utilizado pelas seguintes razões: é mais difícil de carregar, porque as baterias de lítio que utiliza necessitam de corrente muito estável; este tipo de bateria é mais sensível a ciclos de carga e descarga profundos; uma vez que o *power bank* não fornece corrente se a corrente pedida for inferior a 60mA, por vezes deixaria de fornecer corrente ao microcontrolador do módulo.



Figura 4.22: *Power bank* testado.

Utilizando o painel solar anteriormente referido e considerando um dia médio de inverno, é possível carregar a bateria em aproximadamente quatro dias.

Controlador de carga

Para evitar a sobrecarga da bateria, maximizar o tempo de carga diário e aumentar o seu tempo de vida, é usado o controlador de carga da figura 4.23. O controlador de carga utilizado pode trabalhar com uma potência máxima de 48W, corrente máxima de 4A, quando em *standby* o seu consumo é de 0W, as suas dimensões são 275mm x 38mm x 63mm e tem 0.051kg [40].



Figura 4.23: Controlador de carga utilizado.

NodeMCU

O *NodeMCU* é um *kit* de desenvolvimento com base num *ESP8266*, possui Wi-Fi, várias portas série, ADC, PWM e é programável no ambiente integrado de desenvolvimento (IDE) do *Arduino*, ou em *LUA*. Para além da flexibilidade do chip *ESP8266*, este pode ser adquirido por dois euros o que o torna extremamente apelativo. O *NodeMCU*, como se pode ver pela figura 4.24, tem dez pinos de entrada e saída (GPIO), nove dos quais são capazes de modelar o sinal (PWM) e de vários tipos de comunicação, tem um pino dedicado à leitura de sinais analógicos (ADC), possui quatro pinos de 3.3V, um de 5V, cinco pinos ligados ao terminal comum e cinco que não estão ligados [41][42]. Todos estes GPIO são capazes de debitar até 12mA e receber até 20mA. O chip possui uma pequena antena integrada e a capacidade de funcionar como estação (STA), ponto de acesso (AP) ou ambos, numa rede Wi-Fi [43].

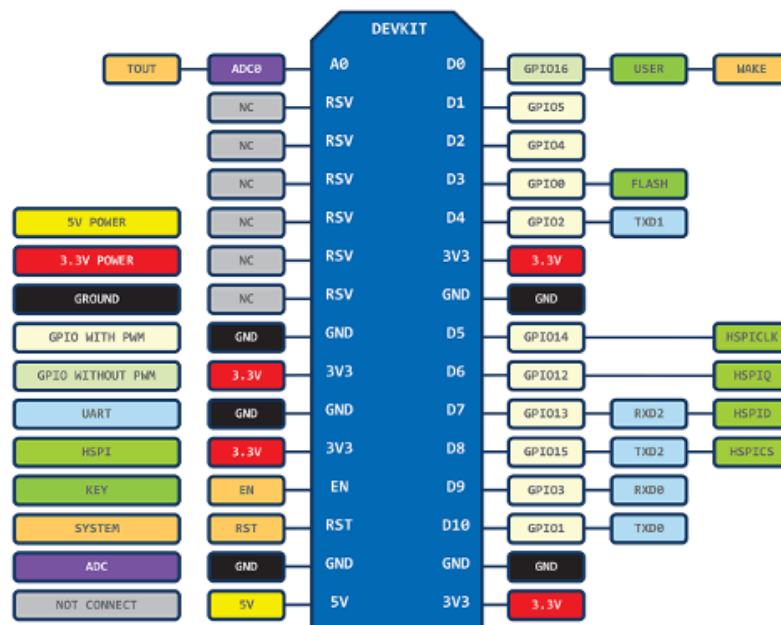


Figura 4.24: Esquema do IO do *NodeMCU* [42].

Na figura 4.25 está uma fotografia do *NodeMCU*. As suas dimensões são 45mm x 30mm. Possui uma porta micro USB (no lado direito na figura) que permite comunicar com um computador, uma antena que pertence ao *esp8266* (no lado esquerdo na imagem) e ainda integra o próprio regulador de tensão para 3.3V.

Em testes efetuados em campo aberto, sem obstáculos nem blindagem, o chip conseguiu manter comunicação via Wi-Fi até pelo menos 200 metros de distância.

Um defeito deste chip é o seu elevado consumo energético que é um problema para um projeto que dependa de baterias. A intensidade de corrente requerida *nodeMCU* quando em funcionamento, com o Wi-Fi ligado e sem periféricos, situa-se entre os 70mA e 80mA. Sendo alimentado com 5V, a potência requerida é 350mW a 400mW. No entanto, nesta oscilação da corrente (70mA e 80mA) esconde-se um outro problema, a corrente medida

atinge os 80mA, porque a comunicação via Wi-Fi provoca picos de consumo que chegam a 300mA, tal como demonstra a figura 4.26, onde foi medida a queda de tensão numa resistência de 2.5Ω (a uma escala de 80 mA / 200 mV, na figura 4.26) [44].

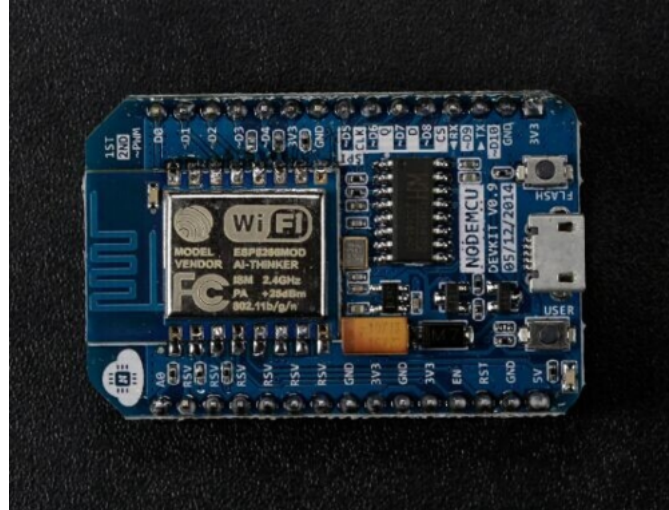


Figura 4.25: *NodeMCU* (não à escala real) [42].

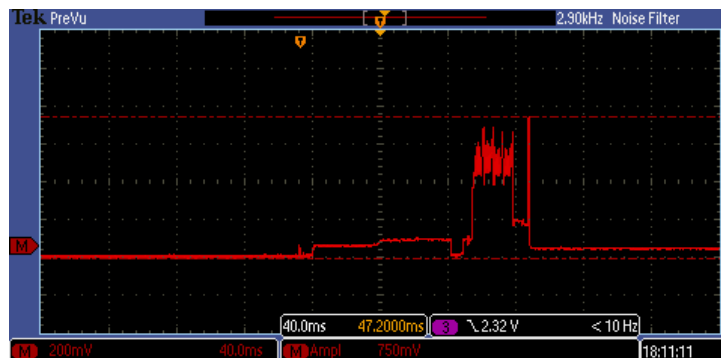


Figura 4.26: Picos de corrente representados num osciloscópio [44]. Adaptado.

Circuito de proteção

Para proteger a unidade de processamento e todos os componentes sensíveis foi criado um circuito de proteção e retificação de corrente e voltagem. Ambos os módulos necessitam de corrente contínua, estável, com um potencial de 5V e 3.3V. Como nenhum periférico utilizado utiliza 3.3V estes são garantidos pelo regulador interno do *NodeMCU*. A primeira abordagem resultou no circuito da figura 4.27. Este destinava-se apenas à proteção contra sobrecarga, curto circuito e inversão da polaridade, mas não incluía um regulador de tensão, que era necessário para alimentar os componentes periféricos e o regulador de tensão do *NodeMCU* com 5V.

A segunda versão incorpora um maior número de componentes e funcionalidades. No esquema da figura 4.28 (e na tabela B.1 em anexo) pode-se observar que os únicos componentes em comum são o fusível F1 (1.5A nos módulos atuadores e 0.5A no sensores)

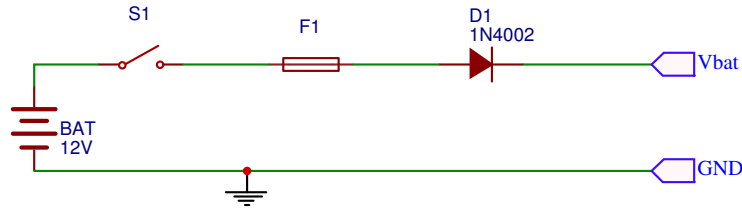
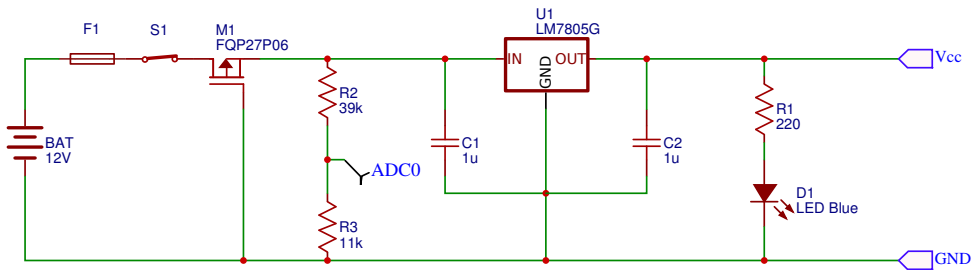
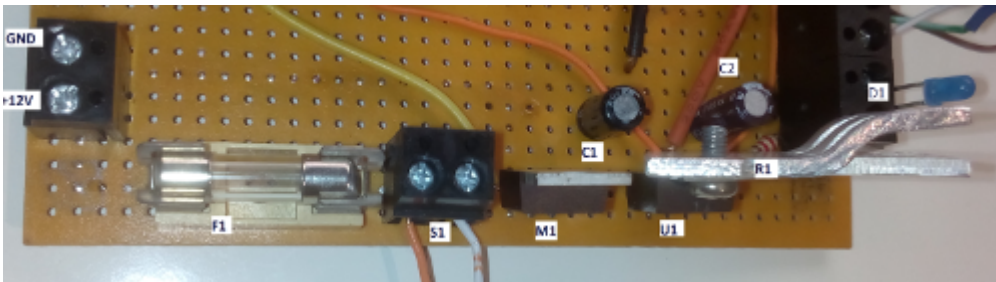


Figura 4.27: Primeiro esboço do circuito de proteção.

que protege o circuito contra correntes elevadas e curto-circuitos, e o interruptor S1 que corta a corrente ao sistema para ligar e desligar o módulo.



(a) Esquema elétrico.



(b) Fotografia.

Figura 4.28: Segunda versão do circuito de proteção.

Começando da esquerda para a direita, tem-se:

- M1 - Mosfet FQP27P06 funciona como proteção contra a inversão da polaridade da bateria. Este mosfet tipo P tem uma voltagem máxima dreno-fonte de -60V, corrente de dreno máxima de -27A, V_{GS} baixo igual a -4V com uma tolerância (V_{GSS}) de $\pm 25V$ e uma resistência quando à saturação ($R_{DS(on)}$) de aproximadamente de 0.07Ω [45]. Quando utilizado como na figura 4.28 só entra à condução quando, entre o a gate e a fonte, existir uma diferença de potencial igual ou inferior a -4V, o que só ocorre se os terminais da bateria forem apertados corretamente na placa. Por outro lado, a pequena resistência interna dissipa muito pouca energia. Por exemplo durante o funcionamento dos módulos a corrente consumida é em média inferior a 0.1A, pela expressão $P_d = RI^2$ tem-se uma potência dissipada P_d igual ou inferior a $0.07 * 0.1^2 = 0.7mW$. Em comparação com um diodo 1N5400, com uma queda de tensão de 0.4V (V_f para uma corrente de 0.1A), cuja potência dissipada

é dada por $P_d = V_f * I$, logo $P_d = 40mW$, a potência dissipada é aproximadamente 57 vezes menor;

- R1 e R3 - Resistências que compõem um divisor resistivo que permite aos módulos controlarem o estado da bateria. O ADC do *NodeMCU* converte valores entre 0V e 3.3V. Para garantir que o valor máximo lido pelo ADC é 3.3 volts foram escolhidos os valores de 39k Ω e 11k Ω para R2 e R3, desta forma para um valor da bateria de 15V o valor V_{out} medido pelo ADC é dado pela equação 4.4,

$$\begin{aligned} \begin{cases} V_{bat} - 0 = (R2 + R3) * I \\ V_{out} = R3 * I \end{cases} &\Leftrightarrow \begin{cases} V_{bat} = \frac{(R2+R3)*V_{out}}{R3} \\ I = \frac{V_{out}}{R3} \end{cases} \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{out} = \frac{V_{bat}}{1 + \frac{R2}{R3}} = \frac{15}{1 + \frac{39}{11}} &\approx 3.27V \end{aligned} \quad (4.4)$$

A partir da equação 4.4 também é possível calcular qual a intensidade de corrente no divisor, que deve ser baixo para evitar gastos desnecessários de bateria. Foram escolhidas resistências de 39k Ω e 11k Ω de forma a que a intensidade de corrente seja aproximadamente 0.3mA, dissipando uma potência $P_d = \Delta V * I = 15 * 0.0003 = 4.5mW$. A resistência do divisor não pode ser mais elevada para não ser afetada pela resistência do ADC que é aproximadamente 1M Ω [46];

- U1, C1 e C2 - Regulador de tensão e condensadores para retificar a tensão. O regulador LM7805 utilizado regula corrente elétrica até 1.5A e resiste a correntes de pico de 2.2A, o que é suficiente para a corrente normal de funcionamento dos módulos, 0.1A, e para a corrente de pico de atuação dos solenoides das válvulas de rega, 1-1.2A [47]. Embora cumpra com as exigências dos módulos o regulador linear tem um grande problema de eficiência. A potência perdida P_p deste componente é dada por

$$P_p = (V_{in} - V_{reg}) * I \quad (4.5)$$

e o rendimento

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_p} = \frac{V_{reg} * I}{V_{reg} * I + P_p} \quad (4.6)$$

onde, V_{in} é a tensão à entrada do regulador, V_{reg} é a tensão de saída regulada e P_{out} é a potência útil. Para este circuito de proteção (e em toda a placa eletrônica dos módulos) a maior perda de energia é neste componente, onde em média $P_p \approx (12 - 5) * 0.1 = 0.7W$ e $\eta \approx 0.5/(0.5 + 0.7) \approx 0.42 = 42\%$. Para corrigir este problema pode ser utilizado um *buck converter* cujo rendimento é normalmente 80-90% [48];

- D1 e R1 - LED azul e resistência de 220 Ω . Este LED recebe corrente sempre que o interruptor S1 estiver fechado e serve por isso de indicador de ligado/desligado para os módulos. A potência dissipada por este conjunto P_d é dada por

$$P_d = \Delta V * I \quad (4.7)$$

onde ΔV são 5V, V_{LED} são 3.2V e I é a intensidade de corrente dada por

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_{LED} + R1 * I \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow I &= (\Delta V - V_{LED})/R1 = (5 - 3.2)/220 \approx 8.18mA \end{aligned} \quad (4.8)$$

logo $P_d \approx 41mW$.

Da lista anterior, pode estimar-se a potência consumida pelo circuito de proteção somando a potência dissipada em cada um dos seus componentes, de onde se obtém uma potência de operação do circuito de proteção $P_{OCP} = 0.040 + 0.0005 + 0.700 + 0.041 \approx 0.78W$.

Módulos atuadores

Os módulos atuadores, por serem responsáveis por atuar válvulas de rega, necessitam de componentes capazes de lidar com correntes mais elevadas. Na figura B.1, esquema elétrico do módulo atuador (em anexo juntamente com a lista de peças B.2), estão representados os componentes deste módulo bem como as ligações entre eles. Alguns destes componentes são visíveis na figura 4.29.

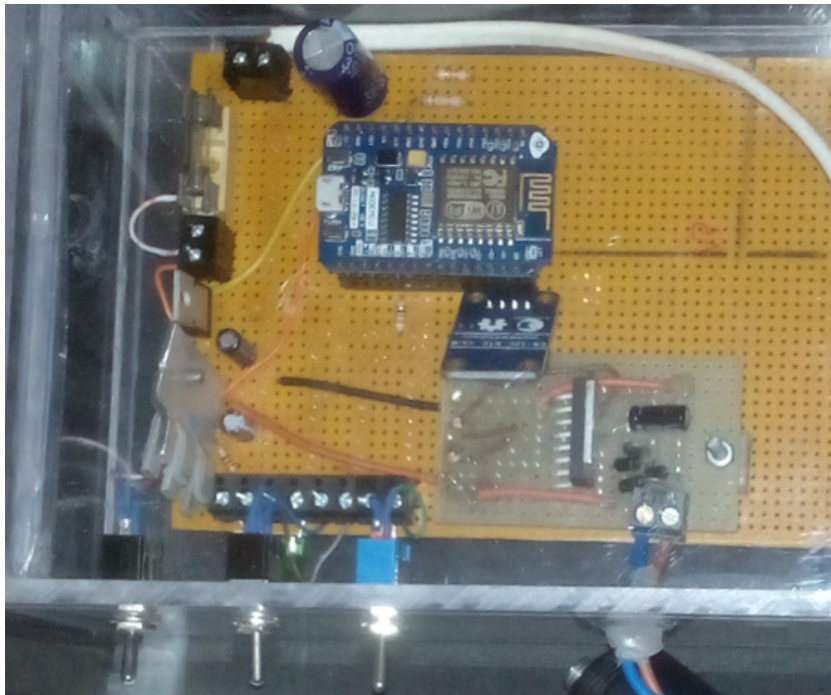


Figura 4.29: Placa eletrónica do atuador.

Começando de cima para baixo, na figura B.1, os componentes ainda não referidos deste módulo são:

- D1 e R6 - LED (e respetiva resistência) para indicação do modo de funcionamento do módulo. A frequência a que o LED pisca permite identificar o modo de funcionamento, estando aceso sem piscar se a rega estiver ativada. R10 é uma resistência 100Ω. Como a queda de tensão no LED é de aproximadamente 2.2V, pelas equações 4.8 e 4.7 determina-se que em funcionamento o LED necessita de uma intensidade de corrente igual a 10mA e o conjunto dissipa 33mW;
- S1 - Seletor de modo manual ou automático;
- S2 - Interruptor momentâneo para ligar ou desligar a rega no modo manual;

- C1 - Condensador $1000\mu\text{F}$ para estabilizar a corrente. Em funcionamento o *esp8266* produz grandes picos no consumo de corrente quando emite um sinal *wireless*, estes picos de corrente são prejudiciais para os componentes da placa e são amenizados por este condensador;
- U5 - Caudalímetro, ou medidores de fluxo (ver figura 4.30). Para medir o caudal de rega é utilizado um caudalímetro que, através do efeito de Hall, emite pulsos que são contados pelo *nodeMCU* e por ele convertidos para litros por segundo (l/s). No caudalímetro utilizado a relação entre pulso e caudal é $2.73 * 10^{-3}$ litros por pulso para caudais iguais ou superiores a 0.05 litros por segundo. O caudalímetro possui um erro de aproximadamente 6% e não apresenta linearidade para valores de caudal inferiores a 0.05 litros por minuto;



Figura 4.30: Caudalímetro utilizado nos testes.

- U4 - Controlador de motores DC. O chip L298n é um controlador de motores com uma ponte H integrada que permite inverter a tensão nos terminais da válvula de rega [49];
- U3 - É um negador de sinal. Uma vez que os pinos de *forward* e *reverse* do L298n (U4) são atuados alternadamente não são necessários dois pinos do *NodeMCU* para inverter a polaridade solenoide, mas apenas um que é sempre negado no pino oposto;
- B1 - Díodos de proteção. Estes díodos são necessários para dissipar a energia acumulada na bobina do solenoide durante o pulso de abertura ou fecho da válvula;
- L1 - Solenoide que atua a válvula de rega (ver figuras 4.31 e 4.32). Esta é uma válvula de posições mantidas, de 2W e 4Ω que é atracada com um pulso e é desativada com um pulso de polaridade invertida.



Figura 4.31: Solenoide da válvula.



Figura 4.32: Válvula de rega utilizada.

Módulos sensores

Os módulos sensores são responsáveis por medir a temperatura e a humidade do ar e do solo. Os seus periféricos têm consumos energéticos reduzidos e, como será discutido num próximo paragrafo, só estão ativos quando o *nodeMCU* também está. Na figura B.2 e tabelas B.3 (em anexo), respetivamente, esquema elétrico e lista de peças do módulo sensor, estão representados os componentes deste módulo, bem como as ligações entre eles. Alguns destes componentes são visíveis na figura 4.33.

Mais uma vez, seguindo o esquema elétrico de cima para baixo, os componentes ainda não referidos são:

- C1 - Condensador $1000\mu\text{F}$ para estabilizar a corrente;
- D1 e R1 - LED (e respetiva resistência) para indicação do modo de funcionamento do módulo. A frequência a que o LED pisca permite identificar o modo de funcionamento. A potência e corrente consumidas por este conjunto é igual ao D1 e R6 do módulo atuador;
- U3 - Multiplexador para permitir a medição dos vários valores analógicos dos sensores de temperatura e humidade do solo. O chip utilizado é o CD405xB um multiplexador com oito portas de entrada/saída [50];
- U4 - Sensor de temperatura e humidade da ar. O DTH é um sensor de temperatura e humidade que comunica através do protocolo one wire, mede temperaturas entre o zero e os cinquenta graus centígrados com uma precisão de ± 2 graus e humidade entre os 20 e 90% com uma precisão de $\pm 5\%$ [51];

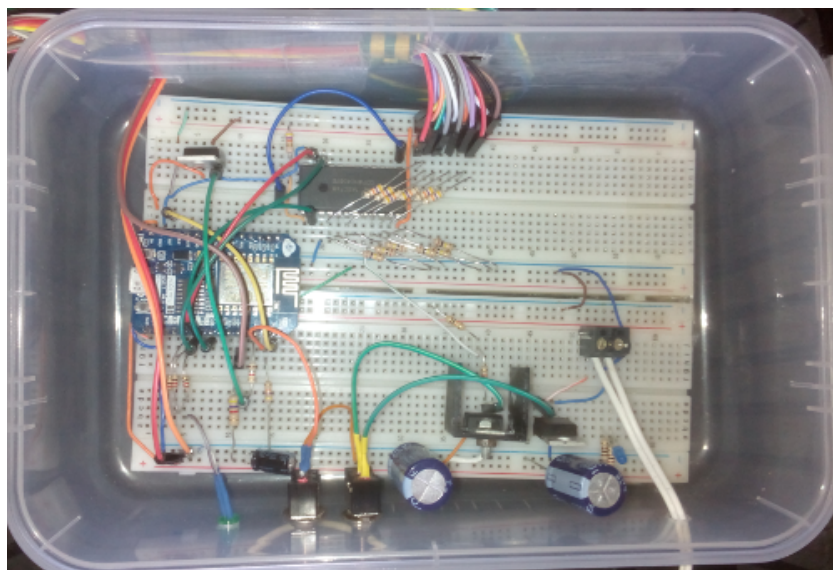


Figura 4.33: Placa eletrônica do sensor.

- U5, U6 e U7 - Sensores de humidade do solo. Estes sensores utilizam um comparador e duas placas metálicas que são enterradas no solo (figura 4.34). As medições são proporcionais à resistência elétrica que está relacionada com o nível de humidade no solo. Embora este não seja o método mais fiável para obter medições do nível de humidade do solo, pois outros fatores influenciam a condutibilidade do solo (por exemplo o ph, ou minerais presentes no solo), é o mais barato e é cada vez mais utilizado.

O sinal lido pelo *NodeMCU* é analógico, ou seja, uma diferença de potencial entre 0V e 5V e é convertido num valor entre 0V e 3.3V por um dos divisores resistivos (R9 até R20) e posteriormente é convertido num valor entre 0 e 1024 pelo ADC;

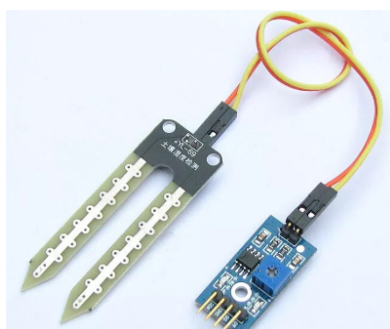


Figura 4.34: Sensor de humidade do solo.

- U8, U9 e U10 - Sensores de temperatura do solo. Para medir a temperatura do solo a diferentes profundidades foi utilizado o sensor de temperatura TMP36. Este tem um baixo consumo energético, não necessita de calibração, tem uma grande amplitude térmica de utilização, funcionando do -40 graus ao 125 graus centígrados, com um erro de $\pm 2\%$. O sinal analógico é proporcional à temperatura medida. A

temperatura é obtida através da equação $T = (\delta V - 0.5) * 0.1$;

- R9 até R20 - Divisores resistivos. Uma vez que todos os sensores analógicos funcionam entre 0V e 5V as resistências de R9 até R20 formam pares de resistências de 39k Ω e 11k Ω (por exemplo R9 e R10) para criar uma queda de tensão de 5V para 3.3V, compatível com o ADC do *nodeMCU*;
- Q1 - MOSFET para ativar e desativar os periféricos da placa. Quando o *esp8266* adormece o GPIO0 é elevado a 3.3V o que faz com que o FQP27P06, o MOSFET utilizado, fique ao corte e desta forma os periféricos não consomem energia quando não estão a ser utilizados;
- S4 - Interruptor utilizado para alternar entre modo automático e manual.

Calibração dos sensores de humidade

Como referido anteriormente, os sensores de humidade do solo carecem de calibração, e contrariamente aos restantes sensores, não existe nenhuma indicação de como os calibrar ou sequer que tipo de relação existe entre o seu valor analógico e o nível de humidade do solo. De forma a estudar a relação entre o valor analógico e os níveis de humidade e saturação do solo foi utilizado o seguinte procedimento:

1. Pesar uma porção de solo e registar o seu peso;
2. Secar solo a 110 graus centígrados durante trinta minutos;
3. Repetir passos 1 e 2 até não existir variação no peso da amostra de solo;
4. Medir 200 gramas de solo seco para um recipiente sem humidade e fechado de forma a não ser contaminado com humidade do ar atmosférico;
5. Medir o pH da amostra;
6. Subterrar a ponta do sensor, esperar até o valor da medição estabilizar e registar valor obtido;
7. Misturar 1% de água à amostra com pipeta e homogenizando a amostra de forma a obter uma boa distribuição da água no solo;
8. Repetir passos 5, 6 e 7 até ser ultrapassado o ponto de saturação do solo.

Com este procedimento é possível obter um gráfico que representa a relação entre o teor de humidade do solo θ_g e o valor analógico do sensor para um determinado pH. Para obter o grau de saturação do solo, através da equação 2.4, é necessário saber: o volume de água no solo V_a que é obtido a partir da massa (m_a) de água no solo e da sua densidade (ρ_a), pela equação

$$V_a = \frac{m_a}{\rho_a} \quad (4.9)$$

e o volume vazio V_v no solo, que é obtido com a relação entre a massa de solo (m_s), a densidade aparente do solo (ρ_s) e a sua porosidade (p_s),

$$V_v = \frac{m_s}{\rho_s} * \frac{p_s}{100} \quad (4.10)$$

Nos testes efetuados foi utilizado solo arenoso (típico do da zona estudada) com uma densidade aparente de aproximadamente 1.6 g/cm^3 , densidade de partículas de 2.6 g/cm^3 , uma porosidade de 40% e com o pH igual a 6.5 e foram obtidos os resultados do gráfico da figura 4.35.

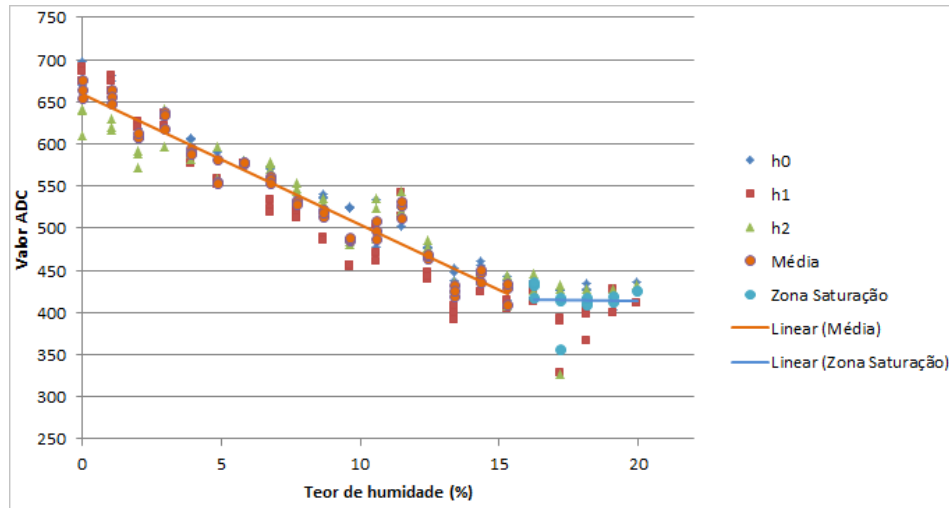


Figura 4.35: Resultados dos testes do teor de humidade do solo.

Conclui-se do gráfico da figura 4.35 que o sinal analógico dos sensores de humidade é proporcional ao teor de humidade no solo até se atingir a zona de saturação. A cor-de-laranja está representada a reta que mais se adequa ao valor médio das medições obtidas e a azul está representada a reta que representa a zona de saturação.

A relação entre o grau de saturação e o valor analógico do ADC, que é o objetivo desta calibração pode agora ser determinada. O grau de saturação, que como já foi referido é proporcional ao teor de humidade, é obtido pela equação 2.4. Com o grau de saturação é possível verificar a sua relação com o ADC. No gráfico da figura 4.36 são utilizados os valores do ADC e saturação até à zona de saturação. A partir do gráfico da figura 4.36 é obtida a reta $y = -0.004x + 2.6361$ e um valor de R^2 igual a 0.94, onde y é o valor de saturação e x o valor do ADC.

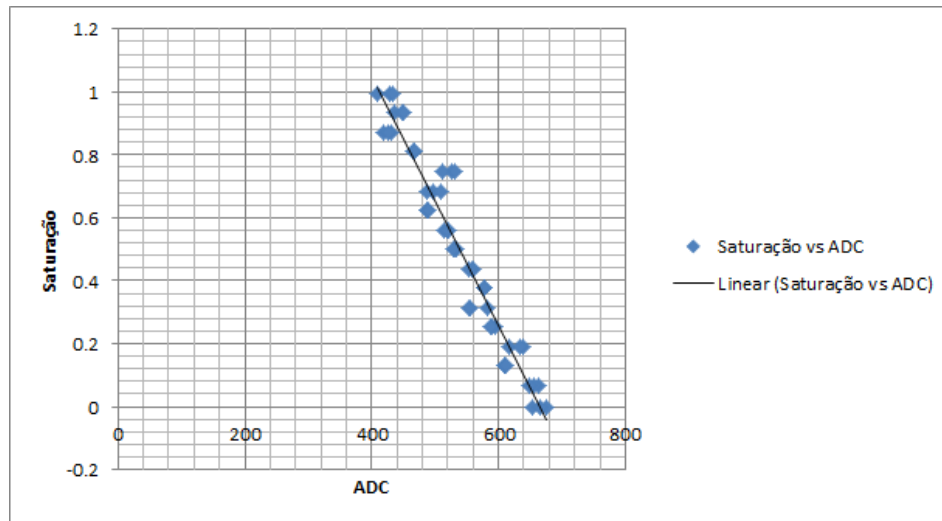


Figura 4.36: Saturação em função do ADC.

4.3.2 Software

Foi utilizado o software *Arduino* para programar os chip *nodeMCU* ⁶.

O *Arduino* possui uma grande comunidade online que produz e testa bibliotecas para vários chips no mercado. Estas bibliotecas não só integram os chips no ambiente de programação de *Arduino*, mas também desempenham funções complexas como algoritmos matemáticos ou comunicar com periféricos, sensores, computadores ou outros chips.

A principal biblioteca utilizada no desenvolvimento do código é a *ESP8266 core for Arduino*, esta faz a base da programação do chip e implementa comunicação Wi-Fi (usando TCP), utilização da memória flash e cartões SD, e comunicação SPI e I²C [52]. Outras bibliotecas utilizadas são *FS - filesystem*, que utiliza as funções de escrita e leitura na memória flash para arquivar ficheiros [53] e *Wire*, que implementa a comunicação one wire utilizada para comunicar com o sensor de temperatura e humidade do ar [54].

O ciclo de funcionamento dos dois módulos, cujas mensagens são descritas na secção 4.1.4 e figura 4.15, é muito semelhante e está representado na figura 4.37. Este ciclo começa com o acordar, seguido de um setup, o loop e finalmente acaba por adormecer, e o ciclo repete-se.

O setup é uma função standard do *Arduino*, o código nela inserido corre uma vez quando o chip é ligado (acorda). Neste caso, no setup são utilizadas funções da biblioteca *filesystem* para ler os ficheiros de configuração guardados na memória flash e assim (como mostra a figura 4.37) configurar o nome da rede à qual o chip se deve conectar, qual o nome do terreno e as coordenadas onde se encontra, verificar se existem erros por corrigir e são também iniciadas as comunicações com periféricos.

O loop é outra função standard do *Arduino* que, como o nome indica, o código é repetido infinitamente. Dentro do loop é onde se dá o processamento de informação e a comunicação com o exterior. Como mostra o diagrama da figura 4.37, a cada iteração do loop,

⁶Para conhecer o código utilizado com maior pormenor está disponível um guião em "https://www.dropbox.com/sh/bqq8dnn4m8bfhsb/AADUnW0GDn_xSrobujel_Lh-a?dl=0"

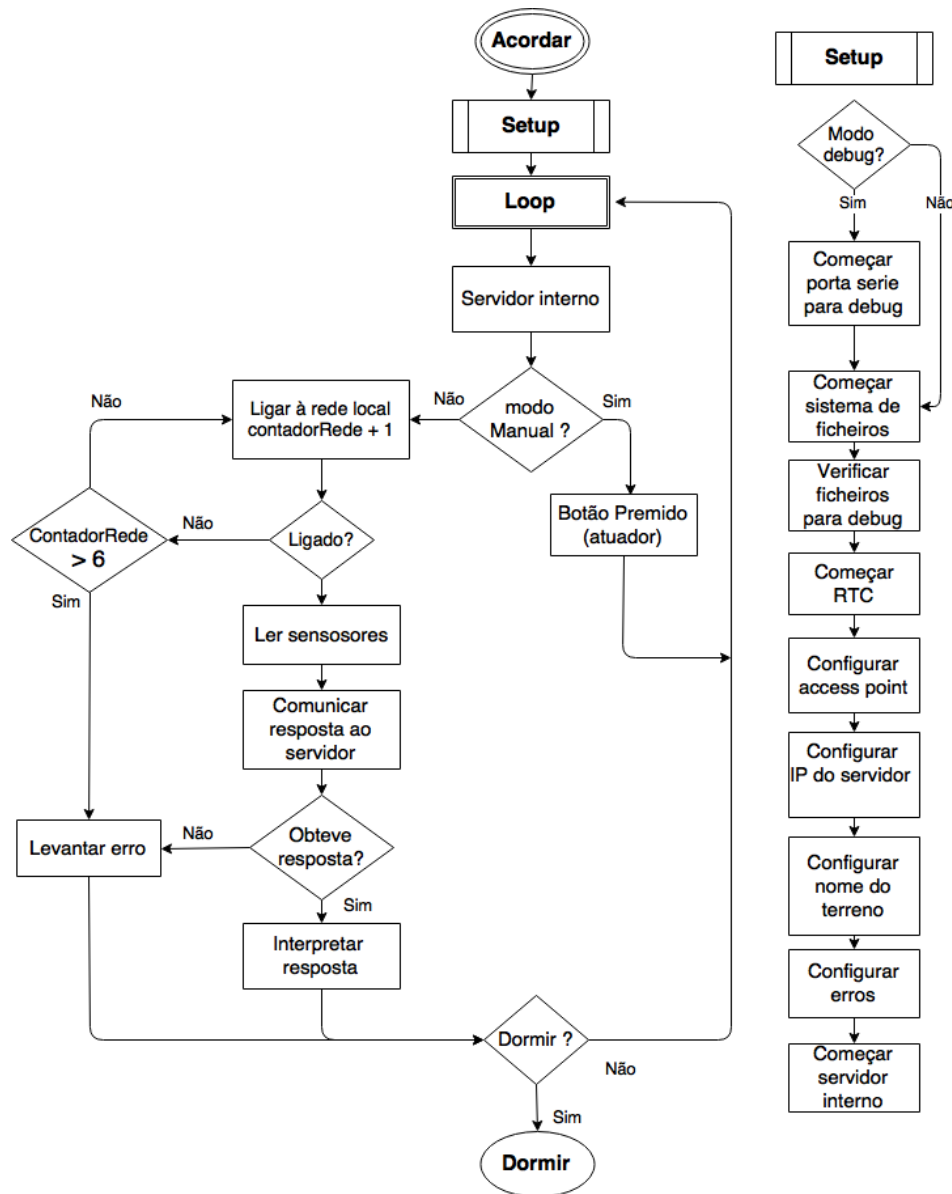


Figura 4.37: Diagrama de fluxo do código.

o módulo verifica se existe alguma atividade no seu servidor interno, em seguida, lendo o valor do interruptor de seleção de modo automático/manual (S1 em ambos) decide que ação tomar:

- No modo manual, o módulo atuador verifica se foi atuado o botão de rega para começar ou parar a rega. No caso do módulo sensor não existe nenhuma ação no loop, em modo manual;
- No modo automático, ambos os módulos verificam se estão conectados à rede do terreno, se não estiverem, tentam ligar-se e se ao fim de seis tentativas não tiverem sucesso levantam um erro e adormecem. Se conseguirem ler os sensores, comunicam os valores à unidade mestre e aguardam resposta. Se a resposta não chegar

ao fim do tempo de timeout os módulos levantam um erro e adormecem, se chegar a resposta, esta é interpretada. A mensagem de resposta da unidade mestra, que foi descrita na secção 4.1.4, pode ser direcionada para os sensores. Neste caso, a mensagem pode conter o tempo de hibernação e a indicação da existência de algum erro. Se for a mensagem direcionada para um atuador, pode conter a indicação de atuação de uma válvula (on/off para ligar/desligar). Quando o atuador recebe uma mensagem de início de rega, não recebe tempo de hibernação, pois durante a rega, este não deve manter-se ligado para que seja possível desligar a rega em caso de emergência.

Erros nos módulos

Durante o funcionamento normal dos módulos podem ocorrer alguns erros. Os erros mais comuns, que são conhecidos, estão guardados numa tabela, em cada módulo, para que estes consigam expor ao utilizador que erro detetaram. A tabela de erros é composta por dois *arrays* com oito posições de comprimento:

```
#define MAX_ERROR_SIZE 8
unsigned int activeError[MAX_ERROR_SIZE] = {0,0,0,0,0,0,0,0};
const char errorArray[MAX_ERROR_SIZE][20] = { {"00000000000000"},
{"AP_-_start_fail"}, {"STA_-_web_fail"}, {"Server_-_no_answer"},
{"Esp_-_bad_url"}, {"Field_-_bad_name"}, {"00000000000000"},
{"Sensor_-_fail"} };
```

Quando o módulo levanta um erro sinaliza-o alterando o valor da posição do erro para o valor verdadeiro "1". Com recurso a esta tabela é possível ao módulo explicitar quais os erros que detetou através da sua interface (que é descrita na secção 4.3.3). Os erros descritos na tabela são:

- 0 Não atribuído;
- 1 "AP - start fail- O chip não conseguiu iniciar a sua rede própria. Este erro compromete a interface com o utilizador, mas não com o servidor web;
- 2 "STA - web fail- O chip não conseguiu conectar-se à rede Wi-Fi do terreno. Este erro compromete a comunicação com a unidade mestra, mas não com a interface do utilizador;
- 3 "Server - no answer- Embora conectado à internet através da rede Wi-Fi do terreno a MTU não respondeu à comunicação. Este erro pode acontecer se a MTU estiver desligada ou mudar de endereço de IP;
- 4 "Esp - bad url- O pedido do chip foi mal formulado ou não conseguiu ser interpretado corretamente. Este erro é levantado pela resposta da unidade mestre;
- 5 "Field - bad name- O nome do terreno não existe, ou o terreno não está ativo, ou o nome da conta que possui o terreno não existe, ou não possui um terreno com o nome enviado;
- 6 Não atribuído;

- 7 "Sensor - fail- Indica que um dos sensores periféricos de um módulo não se está a comportar normalmente. Isto pode dever-se a um sensor mal ligado, desligado ou com qualquer outro defeito.

Filesystem

O *filesystem* (sistema de ficheiros) do *esp8266* permite dividir a memória flash do chip de tal forma que é possível carregar novos *sketch*'s de *Arduino* sem apagar, ou escrever por cima dos ficheiros guardados. Isto é conseguido dividindo o espaço em setores dedicados a diferentes funções. O chip *esp8266* utilizado no *nodeMCU* tem 4MB de memória flash, dos quais 1MB a 3MB podem ser alocados para o *filesystem*. É recorrendo a esta funcionalidade que é possível guardar ficheiros de configuração e até páginas HTML.

O diretório "/" (*root*) do *esp8266* nos módulos contém quatro ficheiros de texto (".txt"), três páginas HTML (".html") e um icon (".ico") como representado no esquema deste diretório da figura 4.38. Os ficheiros de configuração são:

- *config.txt* - Onde é armazenado o nome do módulo e a sua palavra-passe;
- *error.txt* - Onde são armazenadas as posições dos erros por resolver;
- *field.txt* - Onde é armazenado o nome do utilizador e nome do terreno;
- *serverName.txt* - Onde é armazenado o IP da unidade mestra.

Os ficheiros HTML e o icon são utilizados pela interface dos módulos e as suas funções são descritas na secção 4.3.3.

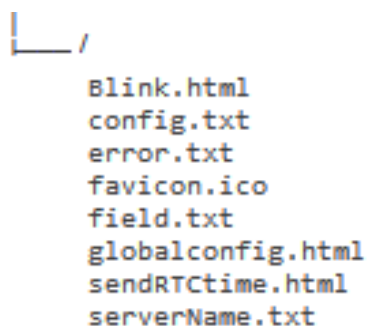


Figura 4.38: Diagrama do diretório do chip *esp8266*.

4.3.3 Interface dos módulos

Pode ser necessário interagir com os módulos por vários motivos: os módulos atuadores podem ser atuados em modo manual, um módulo pode estar a ser configurado para ser utilizado num terreno, ou pode ter um erro por resolver.

Existem três maneiras de interagir com os módulos. A primeira é através da interface da unidade mestra, quando no automático é possível ligar e desligar a rega, alterar o tempo de hibernação, bem como receber informação sobre o estado atual dos módulos (tal como descrito na secção 4.1.3). As outras duas maneiras de interagir são através da interface física e da interface digital, ambas discutidas nesta secção.

Interface física dos módulos

A interface física dos módulos é composta pelos interruptores e LED's de cada placa. Os módulos sensores só possuem um interruptor e um LED com informação sobre o seu funcionamento, como mostra a figura 4.39 (sendo que o segundo interruptor, à direita, pertence ao circuito de proteção). O interruptor S1, de posições mantidas, controla o modo de funcionamento do módulo, manual ou automático. O LED mostra em que modo se encontra o módulo e se possui algum erro. Uma vez que o LED só possui uma cor é usada uma frequência para transmitir informação: se o LED piscar 5 vezes por segundo existe um erro por resolver; se piscar uma vez por segundo está em modo automático; e se piscar uma vez a cada dois segundos está em modo manual.

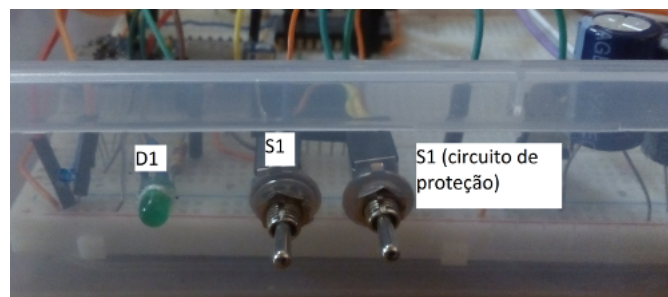


Figura 4.39: Interface física do módulo sensor.

Os módulos atuadores possuem dois interruptores e um LED (ver figura 4.40). O interruptor S1, de posições mantidas, controla o modo manual e automático. O interruptor momentâneo S2, controla o início e fim de rega quando no modo manual. Mais uma vez o LED só possui uma cor e é usada a frequência para transmitir informação: se o LED piscar 5 vezes por segundo existe um erro por resolver; se piscar uma vez por segundo está em modo automático; se piscar uma vez a cada dois segundos está em modo manual; e se o LED estiver ligado sem piscar um ciclo de rega está em curso.

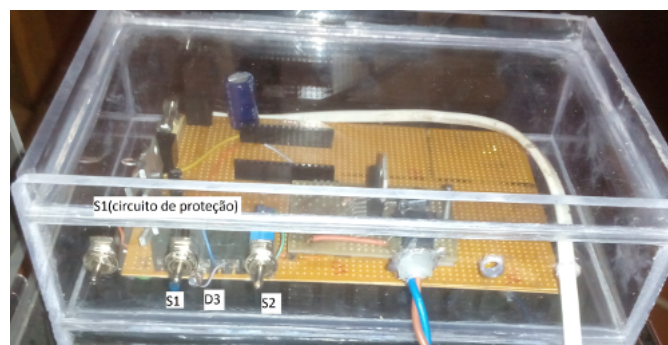


Figura 4.40: Interface física do módulo atuador.

Interface digital dos módulos

A interface digital pode ser acessada por qualquer dispositivo com um *browser* (computador, *smartphone*, *tablet*), através da rede Wi-Fi dos módulos. Quando ligados os

módulos criam uma rede com um SSID composto do seu nome e coordenadas geográficas, por exemplo "espap02_-8.3209_40.1233", e com a palavra-passe "1234578901234". Uma vez ligado à rede é possível obter a HMI através de um *browser*. O endereço de IP de cada módulo é dado por "192.168.n.1" onde "n" é o número do módulo, no caso anterior seria "02" e o IP "192.168.2.1".

Uma vez ligado à rede local a página principal pode ser acedida (na figura 4.41 é demonstrada a estrutura genérica desta página). Na página principal está descrito o nome do módulo, bem como as suas coordenadas, um botão para aceder à página de configuração e um botão para aceder à página de erros.

You are connected to " Nome do módulo "

" Modo de funcionamento Manual/Automático "

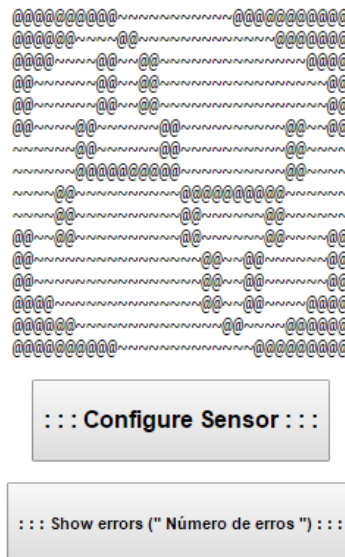


Figura 4.41: Página inicial do módulo.

A página de configuração permite configurar o módulo para ser utilizado em qualquer terreno que exista no sistema e ainda alterar as suas coordenadas geográficas. Nas figura 4.42 podem observar-se os quatro campos a preencher para configurar um módulo, bem como os botões de confirmação da configuração e voltar para a página anterior.

A página de erros mostra quais os erros detetados no módulo. Apresenta uma lista com uma breve descrição do problema, e dois botões. O primeiro botão limpa o registo de erros e o segundo retorna à página inicial (ver figura 4.43).

Existem algumas páginas que não são reveladas na página principal. Estas são a página de configuração do endereço de IP do servidor, configuração do nome e palavra-passe do módulo e a página de ligar o LED.

A página de ligar o LED serve para identificar o módulo no terreno. Aceder a esta página

Configure Esp

Latitude ::

Longitude:

Field: :::::

Owner: :::::

Figura 4.42: Página de configuração do módulo.

System detected errors in:

#erro 1 - descrição
#erro 2 - descrição
#erro 3 - descrição
#... - descrição

Figura 4.43: Página de erros do módulo.

faz o LED brilhar durante 20 segundos. A página (na figura 4.44) é acedida através do caminho `"/blink"` e apenas contém uma contagem decrescente de 20 segundos. Durante estes 20 segundos o módulo não executa mais nenhuma ação.

Blink ends in 19 seconds!

Figura 4.44: Página de ligar o LED.

Para qualquer outro pedido feito ao módulo que não seja reconhecido a resposta é a da figura 4.45, que indica que o pedido não obteve resposta.

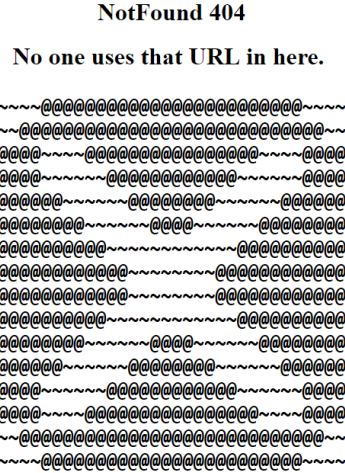


Figura 4.45: Página de pedido não executado.

4.3.4 Montagem final

Nesta secção final da implementação é calculada a autonomia energética dos módulos e é finalmente mostrado o conjunto completo (montado). As duas fotografias em anexo, figuras B.3 e B.4, mostram os módulos lado a lado fechados e abertos respetivamente.

Autonomia energética

Uma vez que os módulos foram pensados para serem portáteis e "sem fios", ou seja, sem ligações elétricas externas, de forma a evitar a construção de infraestruturas e de modo a serem fáceis de utilizar, é necessário assegurar a sua autonomia energética.

Uma vez conhecido o *hardware* é possível verificar se a produção energética satisfaz o consumo. Mais uma vez para os cálculos nesta secção são consideradas as condições de um dia médio de inverno. Sabendo qual a produção energética diária do painel solar, capacidade da bateria e consumo do *nodeMCU*, é possível verificar se a produção diária de energia cobre o consumo e qual a autonomia sem o painel solar.

Como os módulos não funcionam num regime contínuo, mas sim por ciclos de operação e hibernação, é necessário estimar o seu consumo médio. O cenário criado para estimar o consumo utiliza o módulo atuador. Pressupõe tempos de hibernação de três minutos, o tempo mínimo permitido pelo sistema e o mais exigente energeticamente, e um tempo de irrigação de cinco horas. Cinco horas de irrigação, especialmente no inverno, é claramente um tempo exagerado e é utilizado para garantir o funcionamento num cenário anormalmente exigente. O consumo energético dos módulos quando em operação é de 0.11 A e quando em hibernação é de aproximadamente 0.009 A. O tempo de operação por ciclo é de aproximadamente um minuto e o tempo de hibernação, como já referido, será três minutos. Com estas informações é possível calcular o número de ciclos diários (NC) e o consumo por dia de funcionamento (C_d),

$$t_c = \frac{1 + 3}{60} = 0.0667h \quad (4.11)$$

$$C_c = \frac{1 * 0.11 + 3 * 0.009}{60} = 0.0023Ah \quad (4.12)$$

$$NC = \frac{24 - t_r}{t_c} = \frac{24 - 5}{0.0667} = 285dia^{-1} \quad (4.13)$$

$$C_d = NC * C_c + t_r * 0.11 \Leftrightarrow \\ C_d = 285 * 0.0023 + 5 * 0.11 = 1.21Ah/dia \quad (4.14)$$

onde t_r é o tempo de rega, t_c é o tempo de ciclo e C_c é o consumo por ciclo.

É possível agora verificar que o painel solar produz pelo menos 72% mais energia do que a necessária para o funcionamento do módulo, desta forma garantindo o seu funcionamento diário. No que toca à bateria utilizada, esta permite teoricamente o funcionamento do módulo por aproximadamente 6.6 dias. Na prática, isto implicaria que a voltagem da bateria chegasse a valores inferiores a 11.5 V, o que é deteriorante para a bateria e deve ser evitado.

Módulo atuador

O módulo atuador (na figura 4.46) suporta o painel solar (que não é visível nesta figura), contém a bateria, o controlador de carga, a placa com o microcontrolador, e uma ligação impermeável para o solenoide da válvula de rega. Na montagem da válvula de rega, figura 4.47 é possível observar a caixa de ligação (a caixa branca) e a válvula de rega utilizada, ligada ao módulo.



Figura 4.46: Interior do módulo atuador.



Figura 4.47: Montagem da válvula.

Módulo Sensor

O módulo sensor, na figura 4.48, cujo painel solar também não é visível nesta figura, contém a bateria, o controlador de carga, o microcontrolador, ainda numa *breadboard* com os sensores de humidade, e uma caixa pouco permeável à água, à esquerda, para o sensor de temperatura e humidade do ar (em pormenor na figura 4.49).



Figura 4.48: Interior do módulo sensor.



Figura 4.49: Montagem do sensor de temperatura e humidade do ar.

4.3.5 Funcionamento

Os módulos devem ficar armazenados desligados até serem necessários num terreno de cultivo. Quando são necessários num terreno, é utilizado um módulo atuador para cada válvula de rega e são utilizados tantos módulos sensores quanto se desejar. Podem ser utilizados, no máximo, 50 módulos por terreno (entre atuadores e sensores). No mínimo, um que contenha o sistema de retransmissão de dados e um para cada válvula no terreno. Caso o terreno possua uma rede Wi-Fi própria, o módulo com o sistema de retransmissão de dados não é necessário, no entanto o nome da rede (SSID) deve ser "MasterFieldWiFi" e a palavra-passe "MasterFieldWiFi123457890". O nome de rede e palavra-passe aqui apresentados não são definitivos e podem ser alterados no código, no entanto os módulos não podem ser reprogramados para se ligar a uma outra rede que não a que está definida no código.

Como representado nas figuras 4.52 e 4.50, os módulos atuadores têm que ser colocados na proximidade das válvulas às quais estão ligados, com uma inclinação aproximada de 30 graus e orientados para Sul. Já os módulos sensores podem ser distribuídos em qualquer ponto do terreno no qual se deseje conhecer a temperatura e humidade, desde que se encontre dentro da zona abrangida pela rede Wi-Fi e mais uma vez com um ângulo face ao solo de 30 graus e com os sensores de humidade no solo enterrados na zona a medir (como mostra a figura 4.51).

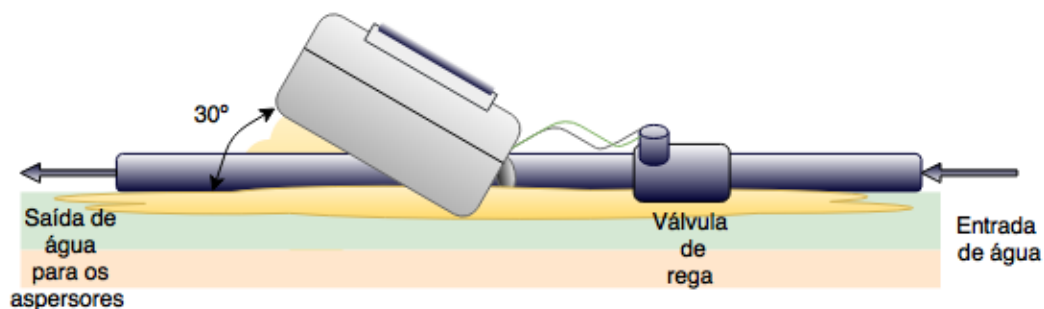


Figura 4.50: Esquema da colocação do módulo atuador na terra.

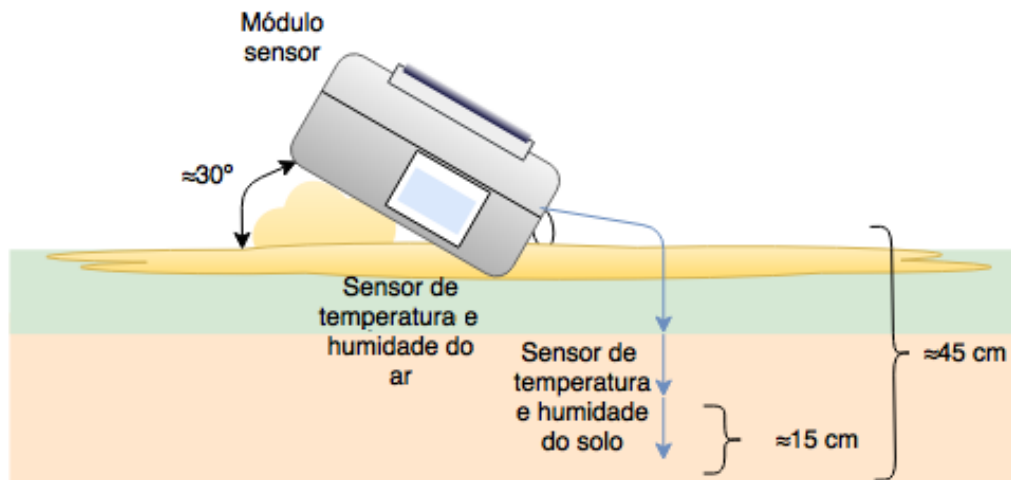


Figura 4.51: Esquema da colocação do módulo sensor na terra.

O sistema retransmissor de dados pode ser utilizado em terrenos com um comprimento igual ou inferior a 150 metros. Para terrenos de maiores dimensões poderão ser utilizados repetidores de sinal e assim obter medições das partes mais distantes do terreno. Quando são colocados no terreno os módulos devem ser configurados pelo utilizador com as suas coordenadas geográficas, nome do terreno e nome da conta do utilizador. Durante o funcionamento, e uma vez configurados, podem ser reconfigurados para serem transladados ou até desligados e voltados a ligar sem consequências para o sistema. Os módulos funcionam em dois modos, manual e automático, para serem configurados devem ser colocados em modo manual, e para prosseguirem o seu funcionamento normal devem ser colocados em modo automático. Uma vez terminada a campanha os módulos podem ser desligados ou reconfigurados e utilizados noutro terreno de cultivo.

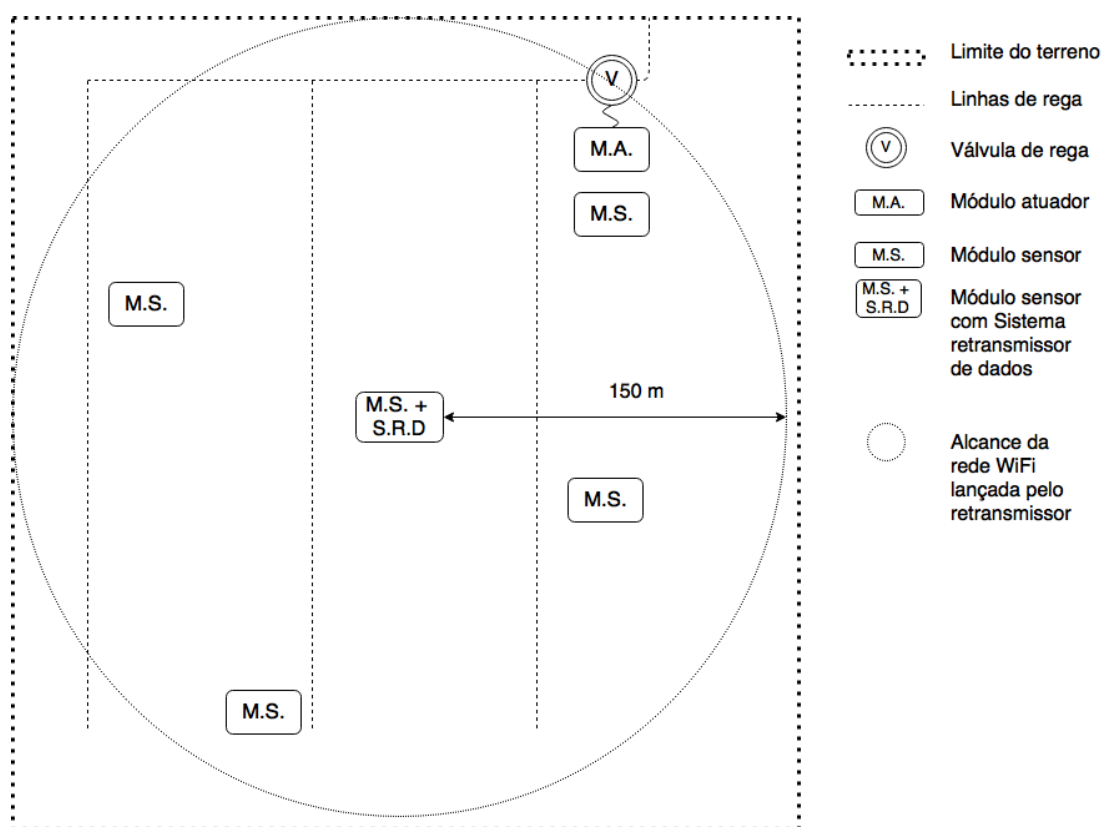


Figura 4.52: Esquema da implementação no terreno de cultivo.

Capítulo 5

Resultados Experimentais

Este capítulo trata da recolha e análise de dados. Estes dados resultam da implementação do projeto descrito nos capítulos anteriores. O capítulo está dividido em três secções: resultados esperados, resultados obtidos e análise de resultados.

O sistema de monitorização e controlo de rega está dividido em três partes, a unidade mestre do sistema de monitorização e controlo de rega, o sistema de retransmissão de dados e os módulos.

5.1 Resultados esperados

Os resultados estão divididos em duas partes, testes à MTU e testes aos módulos e testes ao conjunto do sistema.

Na unidade mestra são testados: no loop interno, funcionamento em intervalos de tempo regulares, alteração do estado da rega e envio de emails com os avisos necessários; no loop do servidor, como serve ficheiros estáticos, qual o tempo de resposta, resposta correta aos pedidos da interface e se altera corretamente as bases de dados; e ainda a recolha de dados dos módulos.

Nos módulos são testados: no modo manual, a interface homem-máquina; no modo automático, os ciclos de hibernação, a recolha de dados, a resposta à MTU e a atuação das válvulas de rega (quando se aplica).

O teste ao conjunto utiliza dois cenários experimentais. O primeiro (ver figura C.1, em apêndice) é composto por um vaso com terra e um depósito de água. Os sensores são colocados no vaso e o módulo atuador controla a rega. O segundo teste (ver figura C.2, em apêndice) foi utilizado para identificar erros no módulo sensor. Neste só foram testados os sensores. Em ambiente controlado foram medidas não só temperaturas, mas também o sinal analógico a elas associado.

Na prática estes dois últimos testes, teste aos módulos e ao conjunto, são efetuados em simultâneo, uma vez que o funcionamento dos módulos no modo automático depende da MTU.

Espera-se um funcionamento que garanta o funcionamento em contínuo do sistema de monitorização e controlo de rega, sem erros que comprometam a atuação da irrigação do terreno. Por "garantir o funcionamento" entende-se:

1. A interface responde aos pedidos do utilizador;
2. A interface é capaz de trocar informação com as bases de dados;

3. Os horários de rega são atualizados conforme programado na interface homem-máquina;
4. Os dados são guardados na base de dados;
5. São detetados os casos limite de humidade, temperatura, nível de bateria baixo e erros nos módulos;
6. São enviados avisos quando é ultrapassado um caso extremo;
7. Os módulos são configuráveis no modo manual;
8. Quando no modo manual os módulos atuadores permitem rega manual (com recurso ao interruptor de rega "S2");
9. Quando no modo automático são respeitados os ciclos de hibernação;
10. São lidos os valores dos sensores a cada ciclo;
11. São adquiridos valores representativos do estado real do campo;
12. São mostrados erros quando existem.

5.2 Resultados obtidos

5.2.1 Resultados dos testes unidade mestre

Como descrito no parágrafo anterior foram testados ambos os loops. Os ensaios efetuados testaram o funcionamento de cada loop contando quantas vezes a sua execução falhou. Uma vez que unidade mestra regista automaticamente as comunicações e os erros é possível saber a percentagem de erros e quais as suas causas.

Loop interno

No loop interno foram testados: a deteção de limites de bateria ou de temperatura ou humidade ultrapassados, o envio de avisos via email, a atualização dos horários de rega e a periodicidade da verificação.

Para testar a deteção dos limites de temperatura e humidade, a temperatura e a humidade foram alterados na interface (figura 4.12, "Limite máximo de temperatura" e "Limite mínimo de humidade") e ainda editados diretamente nas bases de dados "FieldData" os valores da bateria dos sensores. A cada 30 segundos, a estes valores, foram testados e foi produzido (automaticamente pelo programa) um resumo dos valores ultrapassados e enviado um email de aviso. Uma vez que ao testar os limites também é enviado um aviso de email e que os limites são testados a cada 30 segundos, os testes de envio de email e de periodicidade foram efetuados em simultâneo com o anterior. Foram testados 120 ciclos, para os quais os resultados são apresentados no gráfico da figura 5.1.

Para testar a alteração do estado da rega foram criados ciclos de rega e também foi testado o botão "Change" na interface homem-máquina (figura 4.12). Os resultados dos 30 testes efetuados também se encontram no gráfico da figura seguinte (figura 5.1).

Dos testes efetuados apenas foram detetados erros no envio de emails, nos quais 6.6% dos envios falharam. No entanto estas falhas resultaram do bloqueio de SMTP pela porta 578 por uma firewall.

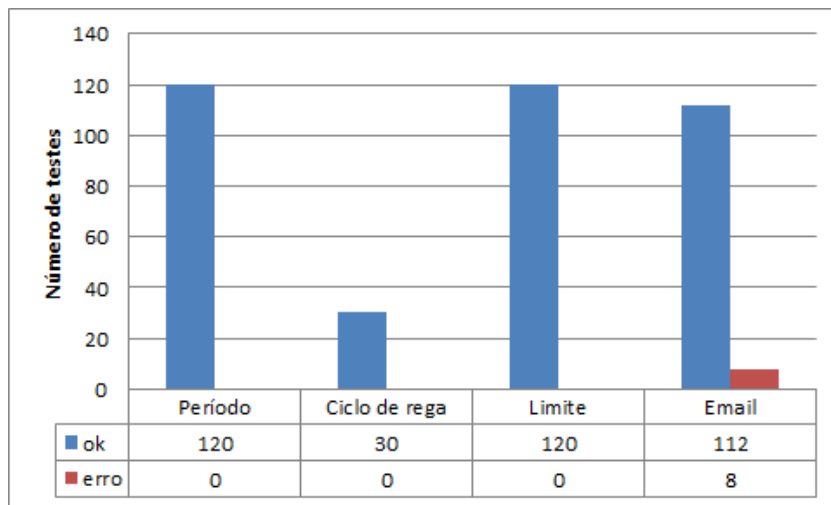


Figura 5.1: Resultados dos testes ao loop interno.

Loop do servidor

Este loop foi testado durante o desenvolvimento e na sua versão final. Durante os testes preliminares foram efetuados 44070 pedidos HTML indiscriminadamente para ficheiros estáticos e para comandos conhecidos pelo servidor da MTU, destes cerca de 21% resultou em erros. No teste da versão final foram feitos 140 pedidos, mais uma vez tanto para ficheiros estáticos como comandos conhecidos da MTU (imitando o funcionamento normal da interface). Deste último teste também foi obtido o tempo de resposta em função do número de caracteres enviados. Os resultados destes testes encontram-se nos gráficos das figuras 5.2 e 5.3.

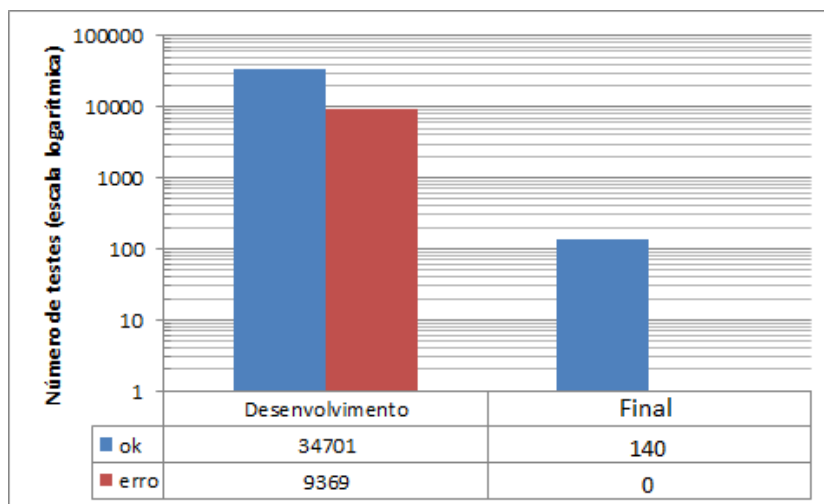


Figura 5.2: Resultados dos testes ao loop do servidor.

Dos 140 pedidos do teste final, 103 implicaram leitura ou escrita numa base de dados e destes em nenhum surgiu um erro. No gráfico da figura 5.3 destacam-se dois pontos com os tempos de resposta bastante elevados, 406 e 583 milissegundos, estes devem-se

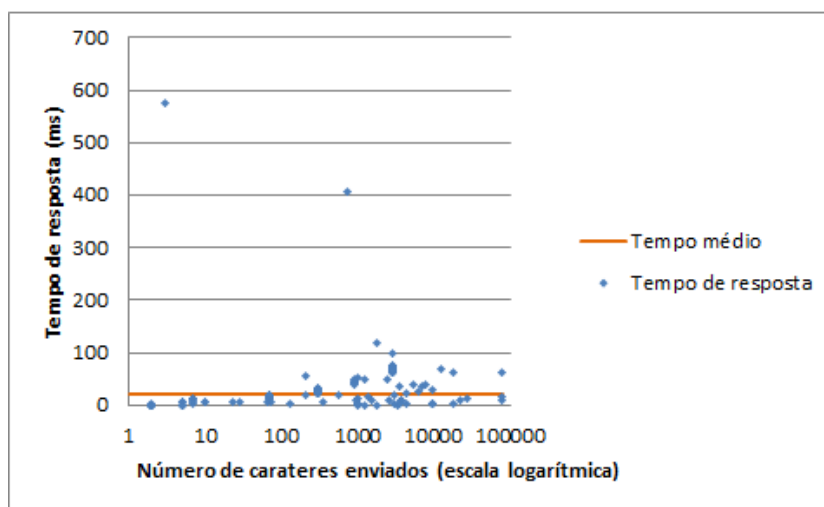


Figura 5.3: Resultados dos testes ao tempo de resposta ao loop do servidor.

respetivamente a: um pedido de leitura dos registos internos da unidade mestre, que só é utilizado para *debugging*; e ao envio do email de início de sessão, que como utiliza um serviço SMTP da Google pode por vezes ser demorado.

5.2.2 Resultados dos testes aos módulos

Neste subcapítulo é feita uma análise qualitativa do comportamento dos módulos no modo manual. Os resultados obtidos do funcionamento no modo automático será discutido em conjunto com os testes ao conjunto.

No modo manual foi testada a interface digital de ambos os módulos e a rega manual do módulo atuador, através da interface física.

Os módulos permitiram a utilização da sua rede *Wi-Fi*, e o acesso às páginas que constituem a sua interface. Os módulos permitiram a sua configuração e limpeza de erros (como descrito no subcapítulo 4.3.3 Interface digital dos módulos).

No teste da rega manual do módulo atuador foram efetuados 10 ciclos de rega, com durações aleatórias, através do interruptor "S2". Todas os ciclos foram concluídos com sucesso sem nunca falhar a atuação da válvula (tanto para o início de rega como para o fim).

5.2.3 Resultados dos testes ao conjunto

Para os testes ao conjunto, como já foi referido, foram utilizados dois cenários experimentais distintos.

O primeiro (figura C.1, em apêndice) testou todo o sistema numa situação semelhante a uma aplicação real. O teste teve a duração de aproximadamente 8 horas num dia pouco nublado e sem chuva. Neste teste foram monitorizados os valores de: temperatura do ar, temperatura do solo, potencial elétrico das baterias, periodicidade das comunicações, duração e cumprimento do ciclo de rega, e por fim, se foram lançados avisos corretos. Embora tenham sido obtidos valores de humidade do ar e do solo, estes valores não são

avaliados quantitativamente, pois não foram medidos os valores reais destas grandezas, e logo não existe um termo de comparação. Durante o teste também foi programado um ciclo de rega com início às 16:30 horas e fim às 17:30 horas.

Uma vez que no primeiro teste, foram obtidos valores fora do esperado para os valores de temperatura do ar, temperatura do solo e potencial da bateria do módulo sensor, foi necessário testar os seus componentes em pormenor. No segundo teste (figura C.2, em apêndice) só foi testado o módulo sensor. Foram utilizados tempos de hibernação de três minutos de forma a obter o máximo de informação em pouco tempo. Este teste decorreu à sombra dentro de um edifício com a temperatura aproximadamente constante. Mediram-se, não só as grandezas que apresentavam erros, temperatura do ar, temperatura do solo e potencial da bateria, mas também o valor analógico dos sensores de temperatura (em voltes) e o valor da diferença de potencial do divisor resistivo ("R3" e "R4") da bateria.

Temperatura e humidade do ar

No primeiro teste a temperatura de referencia foi medida a 50 centímetros do chão e à sombra, logo, esta representa a temperatura do ar. O DTH (sensor de temperatura e humidade do ar) estava a 10 centímetros do solo e a sua caixa estava ao sol.

A temperatura e a humidade do ar medidos pelo módulo no primeiro teste estão representados no gráfico da figura 5.4.

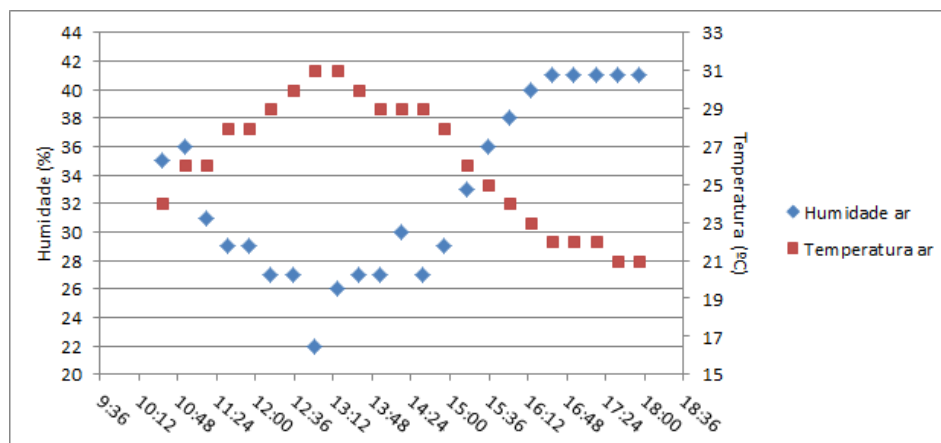


Figura 5.4: Temperatura e humidade do ar (primeiro teste).

Como já foi referido, a temperatura do ar foi medida em ambos os testes. Uma vez que foi exposta ao sol no primeiro teste, o segundo teste permitiu verificar a exatidão do sensor. Nas figuras 5.5 e 5.6 são comparadas as medições do módulo sensor com a temperatura de referência do primeiro e segundo teste, respetivamente.

Temperatura e humidade do solo

As medições de temperatura e humidade do solo são aqui apresentadas e são explicadas na análise dos resultados. Os gráficos das figuras 5.7 e 5.8 apresentam os valores de temperatura.

Os valores de saturação do solo, só medidos no primeiro teste, estão representados no gráfico da figura 5.9. Os sensores de humidade foram dispostos no solo do primeiro teste

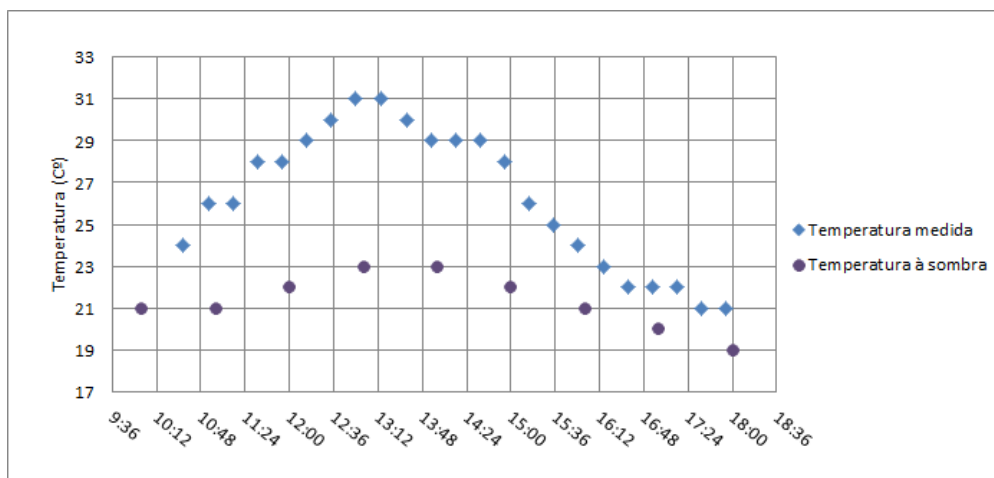


Figura 5.5: Temperatura do ar medida e temperatura do ar à sombra (primeiro teste).

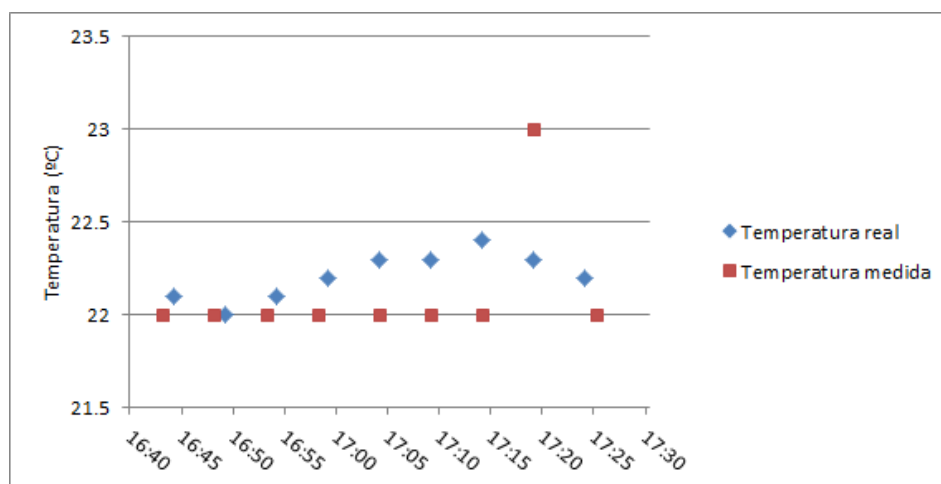


Figura 5.6: Temperatura do ar medida e temperatura do ar, à sombra (segundo teste).

em três condições distintas. Como demonstra o diagrama da figura 5.10 cada sensor testou um zona diferente do vazo. Na zona 0, "Z0", o solo estava inicialmente seco, no entanto, esta é a única zona afetada pela rega. A zona 1, "Z1", estava inicialmente seca e não foi exposta à rega. A zona 2, "Z2", estava inicialmente húmida, e não foi exposta à rega. Estas condições foram criadas para testar os sensores em diferentes condições de funcionamento, e para verificar se a alteração das condições de um dos sensores afeta a leitura dos outros. A zona "Z0" procurou simular um terreno seco que foi irrigado. A zona "Z1" está afastada 10 centímetros da "Z0", foi utilizada como referência para as outras zonas. A zona "Z2", situada também 10 centímetros da "Z0", procurou simular um terreno já irrigado exposto ao sol.

Potencial elétrico das baterias

Uma das grandezas monitorizadas pelos módulos é o nível da própria bateria. Esta medição é utilizada para evitar a descarga excessiva da bateria, e é utilizada para lançar

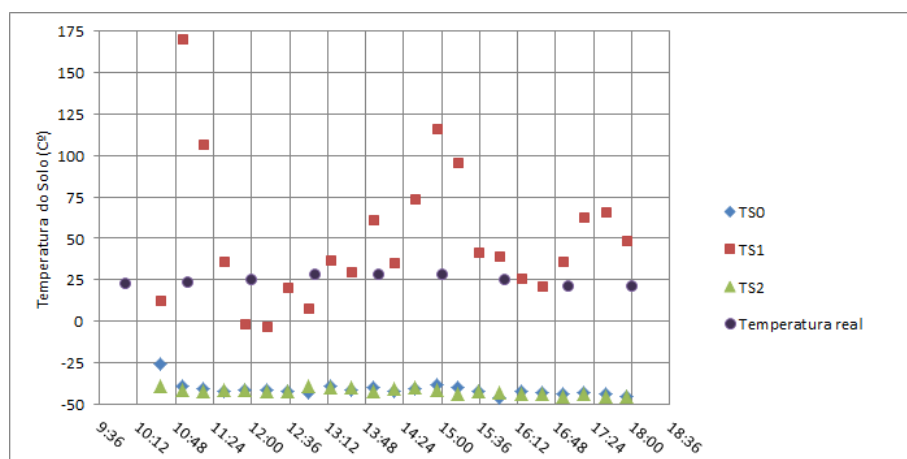


Figura 5.7: Temperatura do solo (primeiro teste).

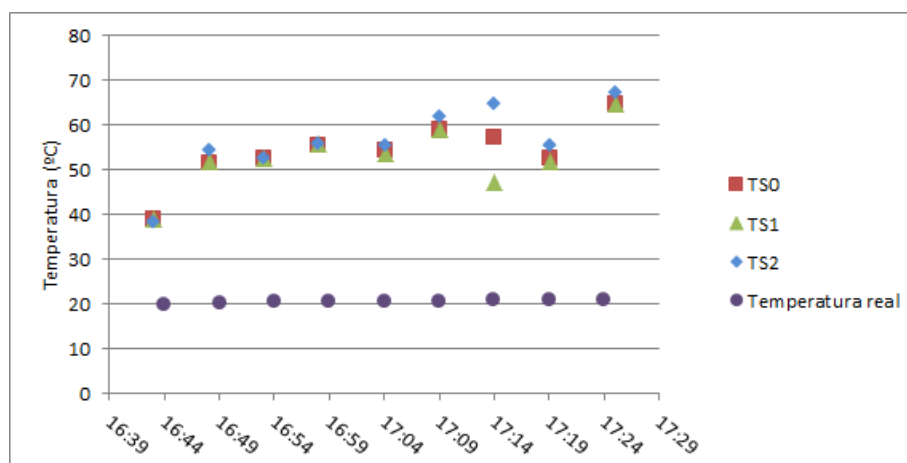


Figura 5.8: Temperatura do solo (segundo teste).

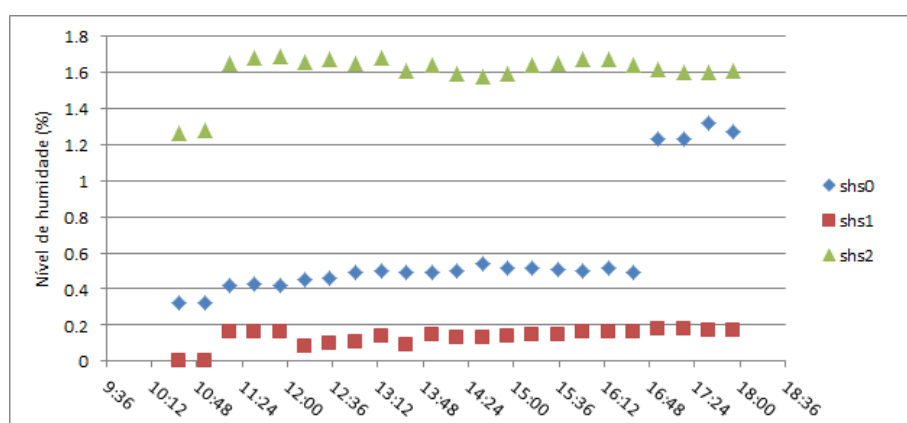


Figura 5.9: Nível de saturação do solo (primeiro teste).

aviso ao utilizador do sistema.

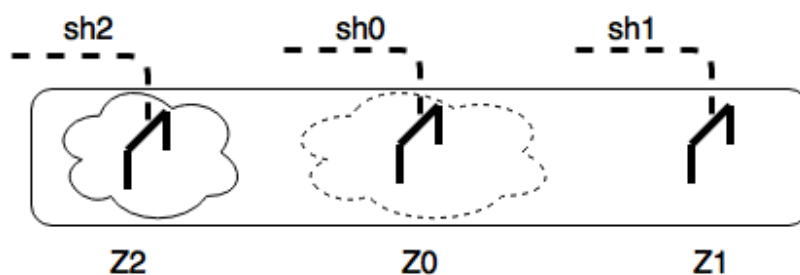


Figura 5.10: Diagrama da disposição dos sensores de humidade no solo testado (primeiro teste).

O gráfico da figura 5.11 reflete as medições da bateria de ambos os módulos.

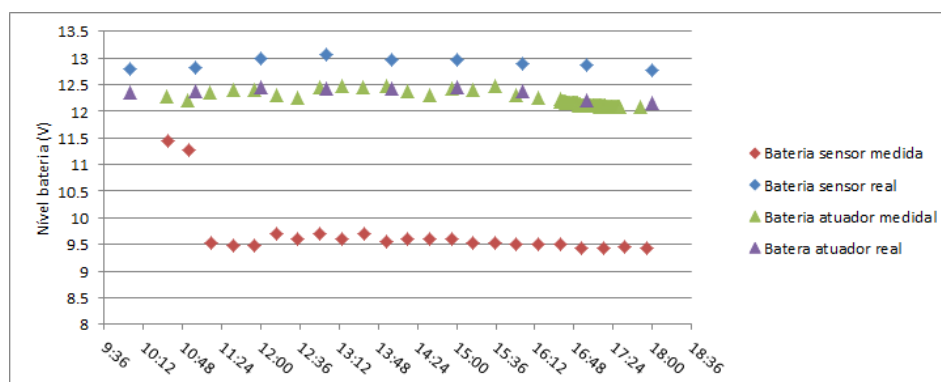


Figura 5.11: Potencial elétrico das baterias (primeiro teste).

Periodicidade das comunicações

A periodicidade das comunicações foi verificada em ambos os testes. No primeiro teste, o tempo de hibernação, definido na interface, foi de 20 minutos. No segundo teste o tempo de hibernação foi alterado para 5 minutos.

Duração e cumprimento do ciclo de rega

Já foi referido que para o primeiro teste foi programado um ciclo de rega com a duração de uma hora (16:30-17:30). Este ciclo foi cumprido dentro do intervalo de tempo esperado. Uma vez que o tempo de hibernação definido para este teste foi 20 minutos, era esperado que a rega tivesse início entre as 16:30 e as 16:50. A irrigação teve início às 16:36 e fim às 17:30. Durante o ciclo de rega os módulos atuadores comunicam com a unidade mestre a cada 30 segundos. No gráfico da figura 5.11 é possível observar o aumento de leituras do nível da bateria, e no gráfico da figura 5.10 é possível observar o aumento do nível de humidade no solo na zona "Z0".

Envio de avisos

O envio de avisos, que já tinha sido testado, funcionou como esperado. Foram lançados dois avisos, um de início de sessão e um alerta de bateria e humidade baixas (figuras

5.12 e 5.13, respetivamente).

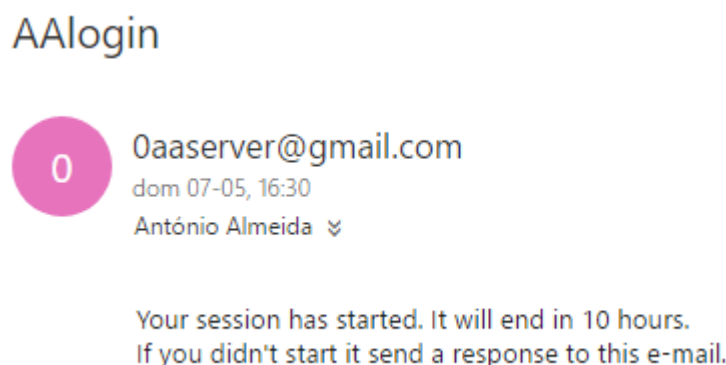


Figura 5.12: Aviso de início de sessão (primeiro teste).

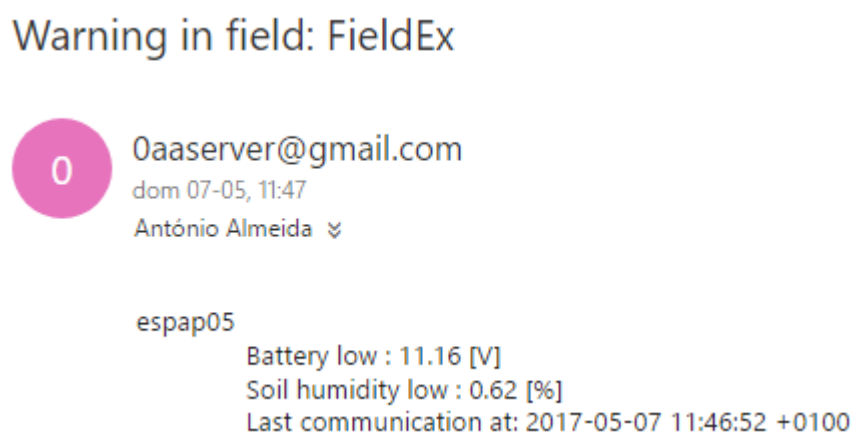


Figura 5.13: Aviso de bateria e humidade baixas (primeiro teste).

5.3 Análise dos resultados

Foram cumpridos onze dos doze requisitos considerados necessários para assegurar o correto funcionamento do sistema de monitorização e controlo de rega.

A unidade mestre do sistema de monitorização e controlo de rega, e a respetiva interface homem-máquina, apresentaram apenas nove erros nos testes efetuados. Oito erros deveram-se a fatores externos ao sistema, como já foi referido. Durante os testes de conjunto nunca foi levantado nenhum erro, a HMI respondeu a todos os pedidos, e todas as comunicações entre o servidor da MTU e a página foram bem sucedidas.

A interface com a base de dados cumpriu os objetivos para os quais foi concebida. Foi verificado que o sistema tem a capacidade de: criar novas bases de dados para novos terrenos; armazenar horários de rega; alterar parâmetros como o tempo de hibernação ou limites de temperatura e humidade. Com recurso à base de dados foi possível terminar e recomeçar o programa sem se perder o estado do sistema de rega.

Também com recurso à leitura das bases de dados o sistema foi capaz de identificar valores limite de nível de bateria, temperatura, humidade e erros presentes no módulos. Após a identificação destes erros, durante ambos os testes do conjunto, o sistema enviou os avisos como previsto.

Os módulos foram testados com sucesso nas suas quatro vertentes, a saber: em modo manual foi testada a configuração do terreno e a rega manual; no modo automático foram testados os ciclos de leitura de sensores e a rega automática.

Capítulo 6

Discussão de Resultados

6.1 Conclusão

A procura de novos métodos de monitorização e controlo de sistemas de irrigação foi o objetivo do trabalho que se apresenta nesta dissertação. A solução encontrada é constituída por um sistema que é capaz de fornecer ao utilizador informação sobre um qualquer local em qualquer das parcelas cultivadas, e em simultâneo permite a atuação dos sistemas de rega remotamente.

A irrigação é um fator de produção imprescindível na agricultura moderna. Esta realidade confronta-se com as carências de água do clima mediterrâneo, e ainda com os efeitos já sentidos das alterações climáticas, que em particular no sul do país tendem para a redução das precipitações e subida das temperaturas. Por outro lado o aumento da produtividade agrícola é igualmente um fator crítico para a sobrevivência e a prosperidade das empresas do setor, pelo que todos os ganhos de eficiência no processo produtivo permitem conseguir vantagens competitivas no mercado nacional e sobretudo no mercado internacional.

Por tudo isto torna-se imprescindível aumentar a eficiência dos sistemas de rega, reduzindo consumos e desperdícios, mas também otimizando a água enquanto fator de produção determinante da quantidade e da qualidade das produções. Quem tenha uma centena de hectares com culturas distintas e em diversos estados de desenvolvimento, confronta-se com uma real dificuldade de acompanhar as culturas em tempo útil, e consequentemente dar a melhor resposta às necessidades das plantas: a simples falta de uma rega oportuna pode ter sérias consequências sobre a produtividade e rendimento. Por outro lado a necessidade de iniciar ou terminar ciclos de rega em locais distintos (às vezes a distâncias consideráveis entre si) cria mais uma dificuldade que se consubstancia em perdas de rendimento ou necessidades de contratação de mais mão-de-obra.

Foi para dar resposta a este conjunto de necessidades dos nossos agricultores do sudoeste alentejano que foi desenvolvido o presente estudo que corresponde à procura de novos métodos de monitorização e controlo de sistemas de irrigação, que permitam ao agricultor reduzir o consumo de água, mantendo ou melhorando a produção, sem necessidade de construção de infraestruturas nos terrenos cultivados, e permitindo reduzir custos resultantes das deslocações entre parcelas para atuar os sistemas de irrigação. Neste sentido foram concebidos e concretizados dois protótipos de módulos autónomos com duas funções distintas. Um deles contém sensores que permitem monitorizar as condições de temperatura e humidade do ar e do solo. O outro tem como função ativar sistemas de

rega. Em ambos os casos os módulos têm capacidade de monitorizar o seu nível de energia, de comunicar erros de funcionamento e de enviar toda esta informação via *Wi-Fi* para um servidor encarregue de gerir os terrenos.

Este servidor, unidade mestre do conjunto das parcelas, é o "gestor" e elo de ligação entre os diversos intervenientes de todo o sistema e inclui uma base de dados com os registos provenientes dos módulos de campo. Em condições definidas pelo utilizador, o servidor envia automaticamente alertas via email, estes alertas detalham quais as irregularidades detetadas e em que módulos ocorreram. É também função desta unidade fornecer ao utilizador uma interface com o sistema e receber comandos do mesmo. A interface permite ainda ao utilizador aceder à informação proveniente de todos os seus terrenos cultivados, calendarizar regas, e iniciar ou terminar operações de rega em qualquer ocasião.

Os erros e problemas observados no decurso da implementação experimental deste projeto resultaram fundamentalmente da baixa qualidade dos sensores utilizados e da montagem dos equipamentos numa placa de prototipagem. O maior problema desta implementação é o consumo energético excessivo, que como já foi discutido pode ser reduzido substituindo o regulador de tensão utilizado por um componente mais eficiente. Qualquer uma das outras situações deverá ser facilmente ultrapassada, quer pela utilização de sensores de melhor qualidade, quer pela montagem do sistema numa placa com um circuito impresso.

Com esta dissertação foi criada com sucesso uma base sólida para o desenvolvimento de sistemas de monitorização e controlo de rega mais avançados e mais eficientes. E embora tenha sido cumprido o objetivo definido para esta dissertação, são inevitáveis as propostas para melhoria bem como sugestões para o rumo a seguir. Nos próximos parágrafos (na secção 6.1.1) são tecidos alguns comentários sobre as melhorias necessárias ao sistema e é sugerido um rumo para trabalhos futuros que façam deste a sua base.

6.1.1 Trabalhos futuros

Tendo este estudo como base, será possível no futuro desenvolver e otimizar os componentes utilizados de forma a construir uma solução mais robusta. Propõe-se quatro pontos de interesse para a continuação desta dissertação, estes são:

- Criação de placas impressas para ambos os módulos;
- Substituição do regulador de tensão por um componente mais eficiente;
- Implementação de sensores de pressão e criação de avisos para baixa pressão;
- Criação de um algoritmo de controlo de irrigação que ajuste os tempos dos ciclos de rega às condições no terreno. Sugere-se a utilização de limites máximos e mínimos de todos os parâmetros medidos e até a utilização de previsões meteorológicas.

Com as alterações sugeridas será possível criar um sistema com medições mais fiáveis, com a capacidade de detetar mais problemas na irrigação e, acima de tudo, capaz de aumentar ainda mais a eficiência dos sistemas de irrigação atualmente utilizados.

Bibliografia

- [1] USGS, “The Water Cycle, from USGS Water-Science School,” 2015. Disponível em: <http://water.usgs.gov/edu/watercycle.html> (Consultado a: 2016-02-22).
- [2] PESETA, “Climate changes impact in Europe,” European Commission Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, Tech. Rep., 2009.
- [3] “Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas,” 2010. Disponível em: http://www.apambiente.pt/_zdata/Políticas/AlteracoesClimaticas/Adaptacao/EN AAC/RelatDetalhados/Relat_Setor_EN AAC_Agricultura.pdf
- [4] “Resolução do Conselho de Ministros n.º 56/2015,” 2015.
- [5] J. M. Baptista, M. D. C. Almeida, a. C. M. Silva, R. Ribeiro, R. M. Fernando, A. Serafim, I. Alves, e M. Cameira, “Programa Nacional para o Uso Eficiente da água,” Agência Portuguesa do Ambiente, Tech. Rep., 2012.
- [6] J. Fonseca, M. Bergström, A. Sérgio, A. Pereira, A. Leão, e A. Godinho, “Grande Enciclopédia Portuguesa e Brasileira,” Lisboa, pp. 590–600, 1995.
- [7] H. D. Foth, *Fundamentals of Soil Science*. John Wiley & Sons, 1991.
- [8] AgriInfo.in, “Density of Soil: Bulk Density and Particle Density,” 2015. Disponível em: <http://www.agriinfo.in/?page=topic{&}superid=4{&}topicid=271> (Consultado a: 2017-01-01).
- [9] WMO, *Part I. Measurement of Meteorological Variables*, 2008, vol. I & II, nº 8.
- [10] B. Galloway e G. P. Hancke, “Introduction to Industrial Control Networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, nº 2, pp. 860–880, 2013. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6248648>
- [11] W3C, “HTML W3schools,” 2016. Disponível em: <http://www.w3schools.com/html/> (Consultado a: 2016-06-25).
- [12] R. Fielding, J. Gettys, J. Mogul, H. Frystyk, L. Masinter, P. Leach, e T. Berners-Lee, “Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1,” 1999. Disponível em: <https://tools.ietf.org/html/rfc2616> (Consultado a: 2016-06-28).
- [13] R. Novaes, “HTTP/2: Internet mais rápida,” 2015. Disponível em: <http://www.psaf.com/blog/http2-internet-mais-rapida/> (Consultado a: 2016-06-28).

- [14] W3C, “JavaScript,” 2016. Disponível em: <http://www.w3schools.com/js/> (Consultado a: 2016-06-25).
- [15] W3C, “Ajax,” 2016. Disponível em: http://www.w3schools.com/xml/ajax_intro.asp (Consultado a: 2016-06-27).
- [16] Arduino, “Arduino - Introduction,” 2016. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [17] Albatross, “A Brief Description - C++ Information,” 2016. Disponível em: <http://www.cplusplus.com/info/description/>
- [18] Ruby_Community, “About Ruby,” 2016. Disponível em: <https://www.ruby-lang.org/en/about/>
- [19] J. Hinegardner, “amalgalite,” 2016. Disponível em: <https://github.com/copiousfreetime/amalgalite> (Consultado a: 2016-01-01).
- [20] C. Hale, “bccrypt-ruby,” 2016. Disponível em: <https://github.com/codahale/bcrypt-ruby> (Consultado a: 2016-05-12).
- [21] Ruby_Community, “CSV,” 2016. Disponível em: <https://ruby-doc.org/stdlib-2.0.0/libdoc/csv/rdoc/CSV.html> (Consultado a: 2016-03-21).
- [22] Ruby_Community, “Ruby Logger,” 2016. Disponível em: <https://ruby-doc.org/stdlib-2.1.0/libdoc/logger/rdoc/Logger.html> (Consultado a: 2016-03-20).
- [23] SQLite, “About SQLite,” 2016. Disponível em: <https://www.sqlite.org/about.html> (Consultado a: 2016-01-01).
- [24] T. J. P. Martins, “Optimização dos consumos de água na irrigação de campos golfe,” Master thesis, Universidade de Aveiro, 2014.
- [25] L. Pfitscher, D. Bernardon, L. Kopp, e M. Heckler, “Automação da irrigação para melhoria da eficiência energética em lavouras de arroz,” Universidade Federal Pampa, Tech. Rep., 2009.
- [26] J. Gutierrez, J. F. Villa-Medina, A. Nieto-Garibay, e M. A. Porta-Gandara, “Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, n^o 1, pp. 166–176, 2014.
- [27] RainBird, “RainBird,” 2016. Disponível em: <http://www.rainbird.pt/> (Consultado a: 2016-02-15).
- [28] DigCorp, “DigCorp,” 2016. Disponível em: <http://www.digcorp.com/> (Consultado a: 2016-02-15).
- [29] W. Irrigation Solutions, “WiSA,” 2016. Disponível em: <http://www.iisystems.com.au/> (Consultado a: 2016-02-15).
- [30] Aquagri, “Aquagri,” 2016. Disponível em: <http://www.aquagri.com/site/index.php/pt/sobre/aquagri>

-
- [31] Hidrosoph, “Hidrosoph.” Disponível em: <http://www.hidrosoph.com/PT/sobre.html>
- [32] K. ITO e J. Daer, “Mail,” 2016. Disponível em: <https://github.com/mikel/mail> (Consultado a: 2016-01-01).
- [33] T. Berners-Lee, CERN, University of Minnesota, e Xerox Corporation, “Uniform Resource Locators (URL),” 1994. Disponível em: <https://tools.ietf.org/html/rfc1738> (Consultado a: 2016-06-26).
- [34] V. Vasilyev, “fingerprintjs,” 2014. Disponível em: <https://github.com/Valve/fingerprintjs> (Consultado a: 2016-06-20).
- [35] Google, “Google maps API,” 2016. Disponível em: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/> (Consultado a: 2016-04-29).
- [36] A. Wunschik e Yotamberk, “Vis js,” 2016. Disponível em: <http://visjs.org/docs/timeline/> (Consultado a: 2016-01-01).
- [37] A. Wunschik e Yotamberk, “Dynamic, browser-based visualization library,” 2016. Disponível em: <https://github.com/almende/vis/tree/develop> (Consultado a: 2016-01-01).
- [38] “Despacho nº 15793-F/2013,” 2013.
- [39] Xunzel, “Xunzel SolarX 8 datasheet,” 2016. Disponível em: <http://www.xunzel.com/assets/web-solarx-eng-tz.pdf> (Consultado a: 2016-01-01).
- [40] Xunzel, “Xunzel is.kontroll,” 2016. Disponível em: <http://www.xunzel.com/assets/web-xunzel-is.kontroll-eng-tz.pdf> (Consultado a: 2016-01-01).
- [41] TheElectromania, “Programming ESP8266 ESP-12E NodeMCU Using Arduino IDE - a Tutorial,” 2016. Disponível em: <http://www.instructables.com/id/Programming-ESP8266-ESP-12E-NodeMCU-Using-Arduino-/> (Consultado a: 2016-01-01).
- [42] R. Huang, “nodemcu-devkit,” 2016. Disponível em: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit> (Consultado a: 2016-01-01).
- [43] Espressif Systems IOT Team, “ESP8266EX Datasheet,” 2015. Disponível em: <http://download.arduino.org/products/UNOWIFI/0A-ESP8266-Datasheet-EN-v4.3.pdf> (Consultado a: 2016-01-01).
- [44] I. Grokhotkov e Tuxedo0801, “Problems with ESP12f without WiFi on 50mA power source,” 2016. Disponível em: <https://github.com/esp8266/Arduino/issues/2111> (Consultado a: 2016-01-01).
- [45] Fairchild Semiconductor, “FQP27P06,” 2001. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/FQP27P06.pdf> (Consultado a: 2016-01-01).

-
- [46] Espressif Systems, “ESP8266 Datasheet,” 2015. Disponível em: <http://download.arduino.org/products/UNOWIFI/0A-ESP8266-Datasheet-EN-v4.3.pdf> (Consultado a: 2016-01-01).
- [47] Texas Instruments, “LM7805 Datasheet,” 2003. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf> (Consultado a: 2016-01-01).
- [48] H. J. Zhang, “Basic Concepts of Linear Regulator and Switching Mode Power Supplies,” 2013. Disponível em: <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/AN140fa.pdf> (Consultado a: 2016-01-01).
- [49] STMicroelectronics, “DUAL FULL-BRIDGE DRIVER,” 2000. Disponível em: https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf (Consultado a: 2016-01-01).
- [50] Texas Instruments, “CD405xB CMOS Single 8-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer With Logic-Level Conversion,” 2015. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4052b.pdf> (Consultado a: 2016-01-01).
- [51] D-Robotics UK, “DHT11 Humidity & Temperature Sensor,” 2010. Disponível em: <http://www.micropik.com/PDF/dht11.pdf> (Consultado a: 2016-01-01).
- [52] I. Grokhotkov e Mtongnz, “ESP8266 core for Arduino,” 2016. Disponível em: <https://github.com/esp8266/Arduino> (Consultado a: 2016-01-01).
- [53] I. Grokhotkov, H. Chevli, Inazt, e Vicnevicne, “filesystem,” 2016. Disponível em: <https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/doc/filesystem.md> (Consultado a: 2016-01-01).
- [54] C. Grokhotkov, Ivan Kirchgatterer, D. P., e Mvdbro, “Wire,” 2016. Disponível em: <https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/Wire/Wire.h> (Consultado a: 2016-01-01).

Apêndice

Apêndice

Apêndice A

Servidor

Tabela A.1: Lista de caminhos pré-programados no servidor.

```
'close'
'log/error'
'log/info'
'users/puts'
'users/kick'
'espinfo'
'fields'
'fields/'
'fields/login'
'fields/valid'
'fields/login/valid'
'fields/login/check'
'fields/login/create'
'fields/load/info'
'fields/load/fields'
'fields/load/username'
'fields/load/schedule'
'fields/load/espmarkers'
'fields/load/plots'
'fields/load/csv'
'fields/create/field'
'fields/change/field'
'fields/change/schedule'
'fields/logoff'
```

Tabela A.2: Esquema das bases de dados de cada terreno.

```
CREATE TABLE FieldInfo(date integer, product text, kg integer)
```

```
CREATE TABLE FieldData(id integer, date integer, time integer, esp string, lat
real, lon real, bat integer, shs1 integer, shs2 integer, shs3 integer, sts1 integer, sts2
integer, sts3 integer, tar integer, har integer, error text)
```

```
CREATE TABLE FieldValv(id integer, date integer, time integer, esp string, lat
real, lon real, bat integer, onoff integer, p1 integer, q integer, error text)
```

```
CREATE TABLE FieldEsp(esp text, active integer, esptype text)
```

```
CREATE TABLE Schedule(id integer, date integer, time integer, action text)
```


Tabela A.3: Carateres utilizados para gerar webId.

Descrição	Carateres
minúsculas	abcdefghijklmnopqrstuvwxyz
maiúsculas	ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
algarismos	0123456789
símbolos	!@ \$ _ +-

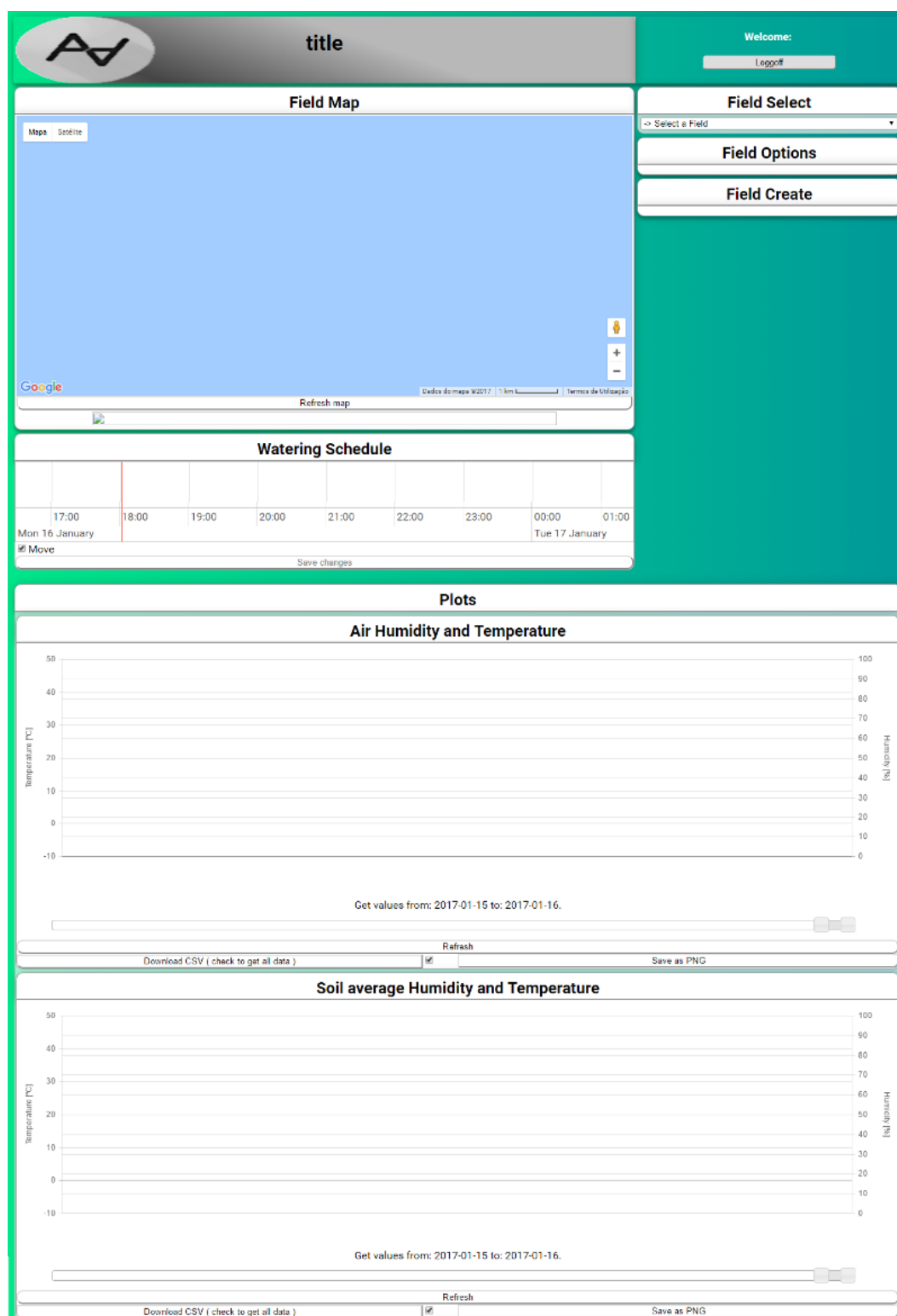


Figura A.1: Página principal de interface homem máquina.

Apêndice B

Módulos

Tabela B.1: Lista de componentes do circuito de proteção.

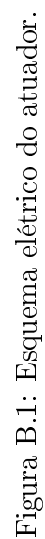
ID	Value	Qty.	Package	Components
1	12V	1	BATTERY	BAT
2	FQP27P06	1	NONE	M1
3	LM7805G	1	TO220	U1
4	1u	2	C1	C1
5	220	1	R3	R1
6	LED Blue	1	LED3MM	D1
7	SPST_ON	1	TACTILE-PTH	S1
8	FUSE	1	NONE	F1
9	100k	1	AXIAL-0.3	R2
10	47k	1	AXIAL-0.3	R3

Tabela B.2: Lista de componentes da placa do módulo atuador.

ID	Value	Qty.	Package	Components
1	NodeMCU_V1_ESP12E	1	NodeMCU_V1.0	U1
2	100k	1	R3	R1
3	47k	1	R3	R2
4	DS1307	1	SO08-TIGHT	U2
5	CRYSTAL	1	TC26H	Y1
6	3V	1	BATTERY	V2
7	4.7k	3	R3	R3 R4 R5
8	1000u	1	C1	C1
9	l298n	1	MULTIWATT15-V	U4
10	LED	1	LED3MM	D3
11	SPST_OFF	1	TACTILE-PTH	S1
12	SWITCH-MOMENTARY-2	1	REED_SWITCH_PLASTIC	S2
13	100	1	R3	R6
14	10k	2	R3	R7 R8
15	Flow_Meter	1	NONE	U5
16	1m	1	INDUCTOR-1206	L1
17	GBJ15005	1	NONE	B1
18	SN74LS04N	1	DIP14	U3

Tabela B.3: Lista de componentes da placa do módulo sensor.

ID	Value	Qty.	Package	Components
1	SOIL-MOISTURE-SENSOR	3	SOIL-MOISTURE-SENSOR	U5 U6 U7
2	DHT22	1	DHT22	U4
3	CD4051	1	SSOP16	U3
4	LED	1	LED3MM	D1
5	100k	1	R3	R3
6	47k	1	R3	R4
7	NodeMCU_V1_ESP12E	1	NodeMCU_V1.0	U1
8	DS1307	1	SO08-TIGHT	U2
9	CRYSTAL	1	TC26H	Y2
10	3V	1	BATTERY	V1
11	4.7k	3	R3	R5
12	BC557	1	TO92-INLINE	Q1
13	100	1	AXIAL-0.3	R1
14	SPST_OFF	1	TACTILE-PTH	S4
15	4.7k	1	AXIAL-0.3	R8
16	1k	1	AXIAL-0.3	R2
17	1000u	1	C1	C1



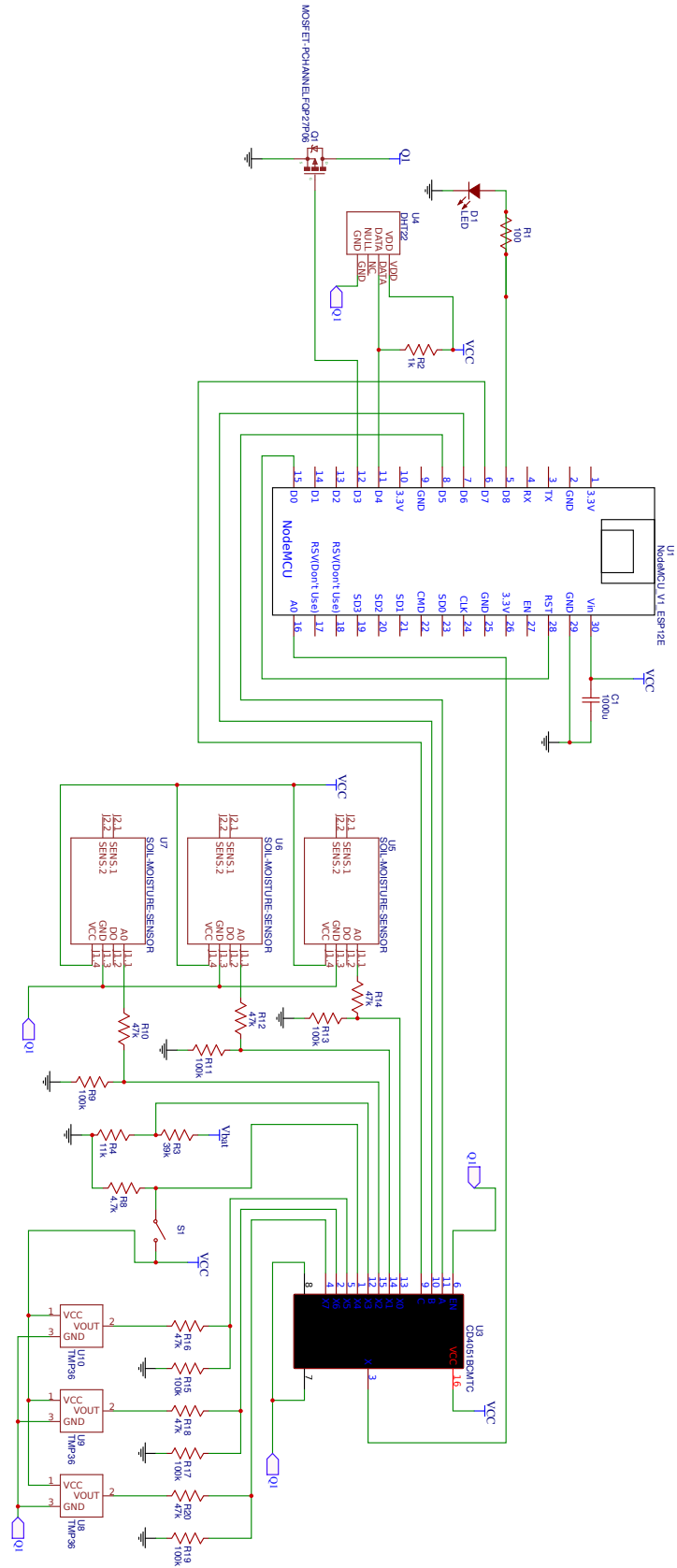


Figura B.2: Esquema elétrico do sensor.



Figura B.3: Módulos sensor e atuador fechados (à esquerda e à direita respetivamente).



Figura B.4: Módulos sensor e atuador fechados (para se estabelecer uma escala a régua azul no chão mede 30 centímetros).

Apêndice C

Resultados



Figura C.1: Primeira montagem experimental.



Figura C.2: Segunda montagem experimental.